LOS SARCOMAS, ARQUETIPOS DE CANCER

INVESTIGACION y CIENCIA

ABRIL 2006
6,00 EUROS

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ACELERADORES DE PLASMA

SINAPSIS INMUNITARIA

ALMACENAMIENTO DE URANIO ENRIQUECIDO

EVOLUCION DE LOS CEFALOPODOS

EL MOTOR DE LA DINAMO TERRESTRE

RECONSTRUCCION DE LA FIGURA DE GEORGE WASHINGTON

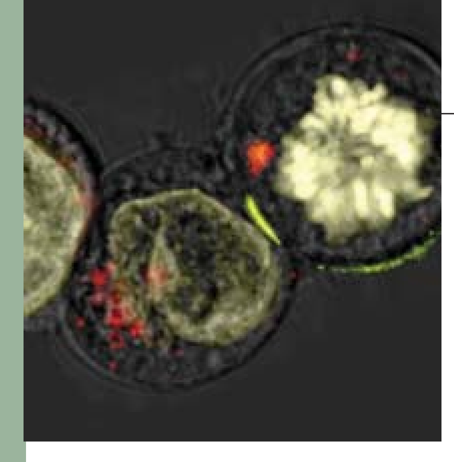




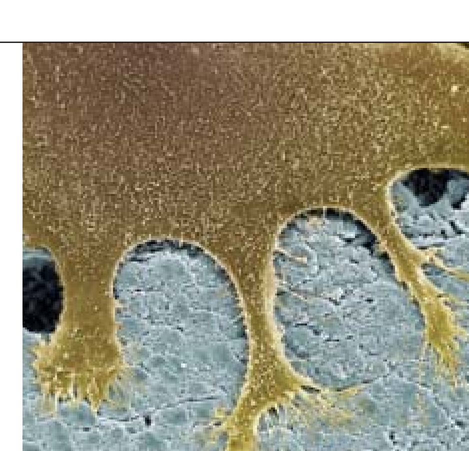
Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Abril de 2006

Número 355



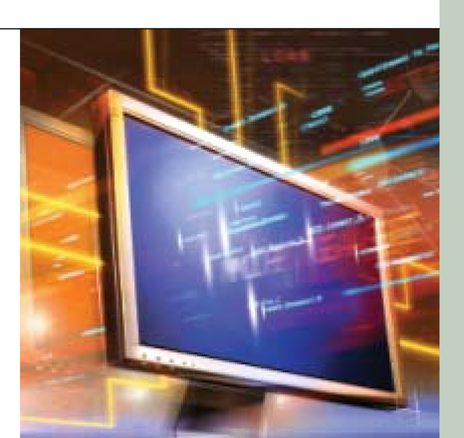




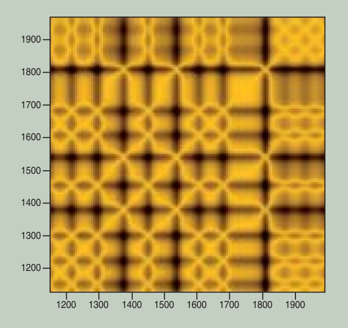




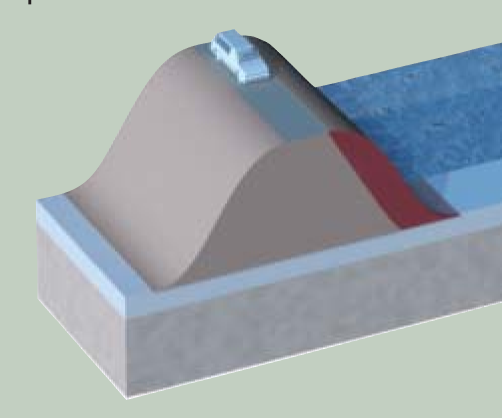







1900
1800
1700
1600
1500
1400
1300
1200
1200
1300
1400
1500
1600
1700
1800
1900







DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:
MOSAICO COMUNICACION, S. L.
Santiago Villanueva Navarro
Tel. y fax 918 151 624
Móvil 661 472 250
mosaicocomunicacion@yahoo.es

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ramón Pascual: *Aceleradores de plasma*; Juan Manuel González Mañas: *Sinapsis inmunitaria*, *Los sarcomas, arquetipos de cáncer*; J. Vilardell: *Almacenamiento seguro del uranio altamente enriquecido*, *Protecciones para Nueva Orleans*, *Hace...*, *Apuntes*, *Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *El motor de la dínamo terrestre*, *Motores de reconocimiento*; Marián Beltran: *Reconstrucción de la figura de George Washington*



Portada: Phil Saunders, *Space Channel Ltd.*

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

REPARTO DE URANIO. «El presidente Eisenhower anunció el mes pasado que EE.UU. destinará 40 toneladas de uranio 235 fisionable para centrales nucleares e investigación. La mitad se venderá o arrendará a organizaciones autorizadas del país; el resto se pondrá a disposición de países extranjeros. Del plan están excluidos la URSS y sus satélites, lo mismo que Canadá y Gran Bretaña, que ya producen su propio combustible nuclear. Estas 40 toneladas de U-235 representan una cantidad de combustible suficiente para generar una potencia eléctrica de cuatro millones de kilowatt, o la carga explosiva neta de unas 3000 bombas atómicas.»

...cien años

EL AVIÓN WRIGHT. «Según la declaración recientemente remitida al Aero Club de América por los señores Orville y Wilbur Wright (declaración, por cierto, primera que los hermanos hacen en su propio país), éstos ya han resuelto el problema del siglo, el vuelo mecánico, con su avión tripulado propulsado por motor. Durante los tres últimos años en que lo han estado experimentando, han realizado 150 vuelos de una milla por término medio, con numerosos cambios y mejoras en la máquina. El vuelo final de 22,5 millas (36 kilómetros) del 5 de octubre pasado cubrió una distancia mayor que el total de los 105 vuelos de 1904.»

COMPROBACIÓN *IN SITU*. «Visité a Dayton en noviembre de 1905 y comprobé la total exactitud de los comunicados que los hermanos Wright firmaron posteriormente para el Aérophile de París y el Aero Club de Nueva York. No albergo duda alguna de que han resuelto el problema del vuelo humano por medios dinámicos. Persuadidos del valor crematístico de su invención, hasta hace muy poco la han guardado en el máximo de los secretos. —[Octave] Chanute»

CATACLISMO EN EL VESUVIO. «La presente erupción es indiscutiblemente una de las más violentas de los tiempos modernos y ha mostrado ya una naturaleza máximamente destructiva. El flujo de lava no ha sido de magnitud extraordinaria, pero la proyección de lapilli y piedras apenas tiene precedentes. A ella hay que achacarle la gran pérdida de vidas, pues la gente, aterrorizada por las detonaciones del volcán y la lóbrega penumbra amarillenta, se agolpó en los edificios, muchos de los cuales se derrumbaron bajo el peso del material caído sobre ellos.»



Patines motorizados, París, 1906.

EL TERREMOTO DE SAN FRANCISCO. «Todo el horror de la devastación que la semana pasada arrasó San Francisco y las ciudades vecinas estalló sobre nosotros antes de que ni siquiera nos hubiéramos percatado de que el desastre de Nápoles había llegado a su máximo. El seísmo responsable último de la destrucción de la ciudad americana más extensa de la costa del Pacífico fue sin comparación el más intenso de los registrados en EE.UU., y estuvo acompañado de la pérdida de centenares, si no millares, de vidas y de la destrucción de propiedades valoradas en centenares de millones. El temblor destruyó casi toda la red de abastecimiento de agua de la ciudad; al redactarse estas líneas, San Francisco es escenario de un incendio generalizado.»

PATINES DE RUEDAS CON MOTOR. «Por su novedad, los nuevos patines de ruedas con motor presentados recientemente en París por M. Constantini, renombrado inventor de carburadores para automóviles, están atrayendo una atención considerable (*véase ilustración*). El cinturón de piel lleva un depósito de gasolina en la parte posterior. Tres damas deportistas harán una carrera con estos patines desde la plaza de la Concordia hasta la Puerta Maillot.»

...ciento cincuenta años

INVESTIGACIÓN CRIMINAL EN PRUSIA. «Recientemente, en uno de los ferrocarriles prusianos, un barril que debía contener monedas de plata se halló, a su llegada a destino, que había sido vaciado de su precioso contenido y rellenado con arena. El profesor Ehrenberg, de Berlín, pidió muestras de arena de todas las estaciones de las líneas por las que habían pasado las monedas y, valiéndose de su microscopio, identificó la estación de la que procedía la arena. Una vez determinada la estación, no fue difícil dar con el culpable entre los pocos empleados que estaban de servicio.»

ASTRONOMIA

Menos binarias

Según los textos de astronomía, tres de cada cinco puntos de luz del firmamento nocturno corresponden a sistemas duales o binarios de estrellas. La estadística se basa en recuentos de estrellas visibles realizados a principios del siglo XX, cuando los telescopios eran menos potentes. Las estrellas más brillantes no abundan mucho: en nuestra galaxia, comprenden entre el 15 y el 20 por ciento de los sistemas estelares. Instrumentos más sensibles han venido observando en los últimos cinco años sistemas de enanas rojas, menos luminosos aunque mucho más comunes. Sólo una cuarta parte pertenece a sistemas binarios, lo que significa que dos tercios de los sistemas estelares son enanas rojas solitarias. El hallazgo debería ayudar a poner orden en las teorías sobre formación estelar, pues a la mayoría de las hipótesis en circulación le resulta más fácil explicar la formación de estrellas solitarias.

—J. R. Minkel



La enana roja (*visión artística*), el tipo de estrella más común, tiende a aparecer sola.

BIOLOGIA

Hallazgo de un mundo perdido

Una expedición científica a una de las más remotas junglas asiáticas, la de los brumosos montes Foja de Nueva Guinea Occidental, descubrió en diciembre de 2005 un tesoro de nuevas especies, flores gigantes e insólita fauna: un par de docenas de especies de anfibios, cuatro nuevas mariposas, la mayor flor de rododendro de que haya constancia (casi quince centímetros de ancho) y aves melífagas. (No se descubría en la isla una nueva especie de ave desde hacía casi 70 años.) Se hallaron ejemplares de canguro arborícola de manto dorado, animal hasta ahora sólo conocido en una montaña de la vecina Papúa Nueva Guinea, y equidnas de nariz larga, mamífero ovíparo primitivo del que se sabe muy poco. De tales descubrimientos deducen algunos que una superficie de más de 10.000 kilómetros cuadrados de la jungla de Foja podría constituir la selva tropical primigenia más extensa de Asia, según anunciaba Conservación Internacional, copatrocinadora de la expedición.

—Charles Q. Choi



En una selva primigenia de Nueva Guinea se ha descubierto la mayor flor de rododendro que se conoce.

ESPECIES INVASORAS

Contra el mejillón cebra

El mejillón cebra, originario de los mares Negro y Caspio, ha colonizado numerosos ecosistemas de agua dulce, incrustados quizás en la quilla de alguna embarcación. Con su llegada caen el fitoplancton y el oxígeno disuelto en el agua; su aglomeración obstruye canalizaciones y tuberías. [Ha invadido —se descubrió en 2001— el cauce bajo del Ebro, a partir de los embalses de Mequinenza, Ribarroja y Flix. Ultimamente se le ha encontrado también en la cuenca del Júcar, en concreto en el tramo del río Mijares comprendido entre la central de Vallat y el embalse de Sichar, si bien debe de estar allí al menos desde 2002.] Dentro de poco se contará con un arma nueva contra ese bivalvo: unas microcápsulas de sal clorada. La cloración es el procedimiento habitual para atacar al mejillón cebra. El problema es que los moluscos detectan el cloro y pueden mantener sus valvas cerradas hasta tres semanas, lo que hace necesario prolongar la adición de cloro, con la consiguiente intoxicación del agua. La nueva arma es el cloruro potásico, una sal especialmente tóxica para el mejillón cebra, pero inocua a bajas dosis para la mayoría de los organismos. En un experimento, esa sal, encerrada en cápsulas de aceite vegetal y otros ingredientes, con un ancho de 105 micras, mató al 60 por ciento de los mejillones cebra, mientras dejaba indemnes a los mejillones endémicos. El tamaño de las cápsulas coincide con el de algunas partículas que esos moluscos filtran del agua.

—Charles Q. Choi



El mejillón cebra podría haber encontrado un mal enemigo en el cloruro potásico encapsulado.

WALT FEIMER *NASA (arriba)*; WAYNE TAKEUCHI; CORTESIA DE *CONSERVATION INTERNATIONAL (centro)*; ED RESCHKE *Peter Arnold, Inc. (abajo)*

MIMETISMO

La bola de los hongos

Algunas especies del género *Athelia* ponen “huevos” falsos para que las termitas, engañadas, les cuiden la progenie. Los esclerocios son esferas filamentosas que, cuando caen sobre cúmulos de excreciones de termitas, donde no encuentran competidores, germinan, con la consiguiente creación de una colonia de hongos. Las termitas, cuando encuentran un esclerocio del mismo diámetro y olor que uno de sus huevos, se afanan en embadurnarla con su saliva hidratante y antibiótica. Esas imitaciones de huevo ni favorecen ni dañan los huevos reales de termita cultivados en placas de Petri: en este infrecuente caso de mimetismo ovular, el hongo engaña a los insectos para su exclusivo beneficio.

—J. R. Minkel



Las termitas cuidan sus huevos y, engañadas, futuras colonias de hongos.

ECONOMIA

La oscura medida del pasado y del presente

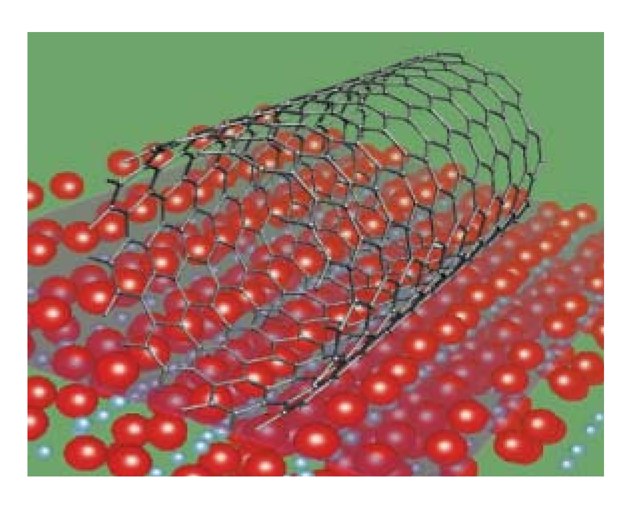
Nada más inequívoco que una estadística económica, podría parecer. La contabilidad nacional que conduce a la cifra del producto interior bruto anual se atiene a criterios bien definidos. Pero para comparar las cifras de unos años y otros hay que descontar el efecto de la inflación. La medida de la inflación es problemática; el mismo concepto lo es. Según el informe Boskin de 1996, la inflación estadounidense se habría exagerado durante años. En consecuencia, el crecimiento real de Estados Unidos habría sido mayor de lo que se pensaba. Pero el informe Boskin sopesó sobre todo un aspecto del problema: los cambios de calidad de productos que antes no existían. Los económetras Robert Gordon y Todd vanGoethem han observado tendencias que podrían invertir, en períodos lo bastante largos, la señalada por el informe. Sostienen que el precio de los alquileres desde 1914 hasta 2003 y de la ropa entre 1914 y 1993 habrían subido más de lo que tiene en cuenta el índice de precios al consumo; si fuese sólo por esos precios, el crecimiento habría sido menor que el calculado a partir del índice. Por otra parte, según las estimaciones ordinarias, los obreros industriales estadounidenses y británicos de finales del siglo XIX eran varias veces más ricos que los pobres de los países subdesarrollados de hoy; sin embargo, éstos podrían gozar de una alimentación mejor que aquéllos. Trevor Logan ha analizado la variación porcentual (elasticidad, dicen los economistas) de la demanda de calorías con el porcentaje de aumento de los ingresos. Bajo la hipótesis de que una mayor elasticidad indica una mayor pobreza, llega a la conclusión de que, o bien los obreros de 1888 eran más pobres de lo que se piensa, o bien los países subdesarrollados de hoy lo son menos, o ambas cosas. En cualquier caso, se habría estado creciendo, en unos lugares, en otros o en todos, más de lo que se cree. Si está claro cuándo un individuo es rico, el grado de riqueza de una nación parece un concepto mucho más escurridizo.

NANOTECNIA

Conducciones cristalinas

Los nanotubos de carbono resultarían unos conductores ideales en los circuitos avanzados, si no fuera por el esfuerzo necesario para alinearlos. La electricidad fluye más rápido por ellos que por el silicio. Los nanotubos pueden medir sólo una quinta parte de las dimensiones mínimas de los componentes de silicio; se prestan muy bien para los dispositivos electrónicos flexibles. Para construir circuitos con nanotubos, se buscan sustratos que orienten los nanotubos de modo natural. Se ha encontrado ya uno, el zafiro. Su cristal hexagonal se eleva sobre una base plana; en la mayoría de sus secciones verticales, los átomos de oxígeno y aluminio se disponen de manera que favorece la formación de nanotubos en hileras ordenadas. Contamos con transistores con nanotubos alineados de ese modo. Para ello, se cubre zafiro comercial con ferritina, una proteína en forma de jaula, y se hornea mientras fluye sobre él un hidrocarburo gaseoso. El hierro de la proteína cataliza el crecimiento de nanotubos de pared única a partir del carbono cedido por el gas. Cuando el zafiro está cubierto de nanotubos, se colocan *in situ* los electrodos metálicos; con oxígeno gaseoso muy ionizado se eliminan los nanotubos restantes. Esta nueva técnica evita las pérdidas de carga (el zafiro es aislante) y ofrece una densidad de nanotubos alineados mayor. Pero debe garantizarse que los nanotubos sean semiconductores.

—Charles Q. Choi



Un sustrato de zafiro, compuesto de átomos de aluminio (*azul*) y de oxígeno (*rojo*), orienta de modo natural los nanotubos de carbono.

KENJI MATSUURA *Universidad de Okayama (arriba)*; SONG HAN, XIAOLEI LIU, DIAHUA ZHANG Y CHONGWU ZHOU *Universidad del Sur de California (abajo)*



Aceleradores de plasma

Un nuevo método de aceleración de partículas, en el cual las partículas avanzan sobre una onda de plasma, promete aplicaciones de muy diverso tipo

Chandrashekhar Joshi

LOS ACELERADORES DE SOBREMESA que producen haces de electrones en un intervalo entre 100 y 200 millones de electronvolt (MeV) son uno más de los tipos de máquinas basadas en la aceleración por plasma.

CHIP SIMONS

Algunas de las preguntas más profundas sobre la naturaleza del universo se contestan gracias a los aceleradores de partículas. Esas máquinas enormes aceleran, hasta casi la velocidad de la luz, partículas dotadas de carga y las hacen chocar entre sí. Recrean de ese modo las condiciones de nuestro universo cuando nacía en la gran explosión. Con el análisis de los restos que las colisiones dejan tras de sí esperamos descubrir la interconexión entre las fuerzas y partículas del universo, que tan dispares parecen, para formular una teoría unificada. Por desgracia, cuanto más cerca se está de esa solución, mayor es la energía y el coste de los aceleradores de partículas necesarios para seguir adelante.

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC), de 8,6 kilómetros de diámetro, ahora en construcción en el CERN, el laboratorio europeo de física de partículas que se encuentra en la frontera franco-suiza, va a ser el mayor acelerador de partículas del mundo. Cuando quede terminado en 2007, las colisiones de sus dos haces de protones, de siete billones de electronvolt, nos harán saber de dónde reciben las partículas su masa. (Un electronvolt es la energía cinética que una diferencia de potencial de un volt proporciona a una partícula con una carga de la misma magnitud que la del electrón.) Otras máquinas actualmente en funcionamiento intentan explicar por qué el universo contiene más materia que antimateria y nos van dando una idea del estado primordial de la materia, el plasma de quarks y gluones. Todos estos colisionadores se basan en un método que tiene ya muchos años: acelerar las partículas con microondas.

Durante los últimos sesenta años, estas máquinas y sus precursoras han venido posibilitando notables descubrimientos sobre la naturaleza de las partículas fundamentales y el comportamiento de la materia nuclear. Los avances en la ciencia y la ingeniería de los aceleradores de partículas, al decuplicar la energía de esas máquinas cada década, facilitaron ese flujo continuo de revelaciones ¿Continuarán tales avances?

Las máquinas basadas en microondas podrían estar acercándose a los límites de lo que es técnica y económicamente factible. En 1993, el Congreso de los Estados Unidos canceló el proyecto del Supercolisionador Superconductor, con un presupuesto de 8000 millones de dólares, un acelerador de 28 kilómetros de diámetro que habría doblado con creces la energía del LHC. Muchos físicos de partículas esperan que al LHC le siga un colisionador lineal de 30 kilómetros de largo, pero quién sabe si ese proyecto, de muchos miles de millones de euros, acabará mejor que el Supercolisionador.

Quizás oportunamente, están apareciendo nuevos sistemas de aceleración de partículas basados en el plasma, el cuarto estado de la materia (junto al sólido, el líquido y el gaseoso). Hay muchas esperanzas de que con ellos puedan construirse aceleradores para la física de las energías más altas (100.000 millones de electronvolt, y aún más). Reducirían muchísimo tamaños y costes.

No todos los aceleradores son gigantescos instrumentos para la física pura, con energías cercanas a la frontera de las altas energías. Se utilizan máquinas más pequeñas para la ciencia de materiales, la biología estructural, la medicina nuclear, la investigación de la fusión nuclear, la esterilización de alimentos, la transmutación de los residuos nucleares y el tratamiento de ciertos tipos de cáncer. Estas máquinas menores producen haces de electrones o de protones de energía no muy alta —en el intervalo comprendido entre 100 millones y mil millones de electronvolt—, pero ocupan todavía grandes espacios en los laboratorios. Los aceleradores de plasma, de "mesa de laboratorio", podrían, pese a su pequeñez, generar haces de electrones en ese mismo intervalo de energías.

Microondas o plasma

Antes de entrar a detallar la nueva tecnología, nos será de ayuda repasar los fundamentos de los aceleradores. Se los puede clasificar de varias maneras, muy generales. En primer lugar, propulsan partículas ligeras (los electrones y los positrones) o pesadas (protones y antiprotones). En segundo lugar, para acelerar las partículas las lanzan por una línea recta que recorren una sola vez o por un anillo circular en el que describen muchas órbitas. El LHC es un anillo donde chocarán dos haces de protones. El colisionador que se espera construir después del LHC será un acelerador lineal, de electrones y positrones. La energía en el punto de colisión será en un principio de alrededor de medio TeV (un billón de electronvolt). A tales energías, se tienen que acelerar los electrones y los positrones en línea recta; en un anillo habría una pérdida excesiva de energía, evacuada por la "radiación de sincrotrón" que los electrones emiten en esas circunstancias. Los aceleradores de plasma se prestan sobre todo a la aceleración lineal de electrones y positrones.

Un colisionador lineal ordinario acelera sus partículas mediante un campo eléctrico que avanza sincronizado con las partículas. La "cavidad de onda lenta" (un tubo metálico con diafragmas dispuestos periódicamente), genera el campo eléctrico mediante una potente radiación de microondas. Que la estructura sea metálica limita la intensidad del campo acelerador. En un campo de entre 20 y 50 millones de volt por metro, tiene lugar la ruptura eléctrica: saltan chispas y hay descargas de corriente desde las paredes de las cavidades. Como el campo eléctrico tiene que ser menor que el umbral de ruptura, se necesita una trayectoria de aceleración más larga para alcanzar una determinada energía. Por ejemplo, un haz de un billón de electronvolt requeriría un acelerador de 30 kilómetros de largo. Si pudiéramos acelerar partículas mucho más rápidamente de lo que permite el límite de ruptura eléctrica, el acelerador sería más corto. Aquí es donde interviene el plasma.

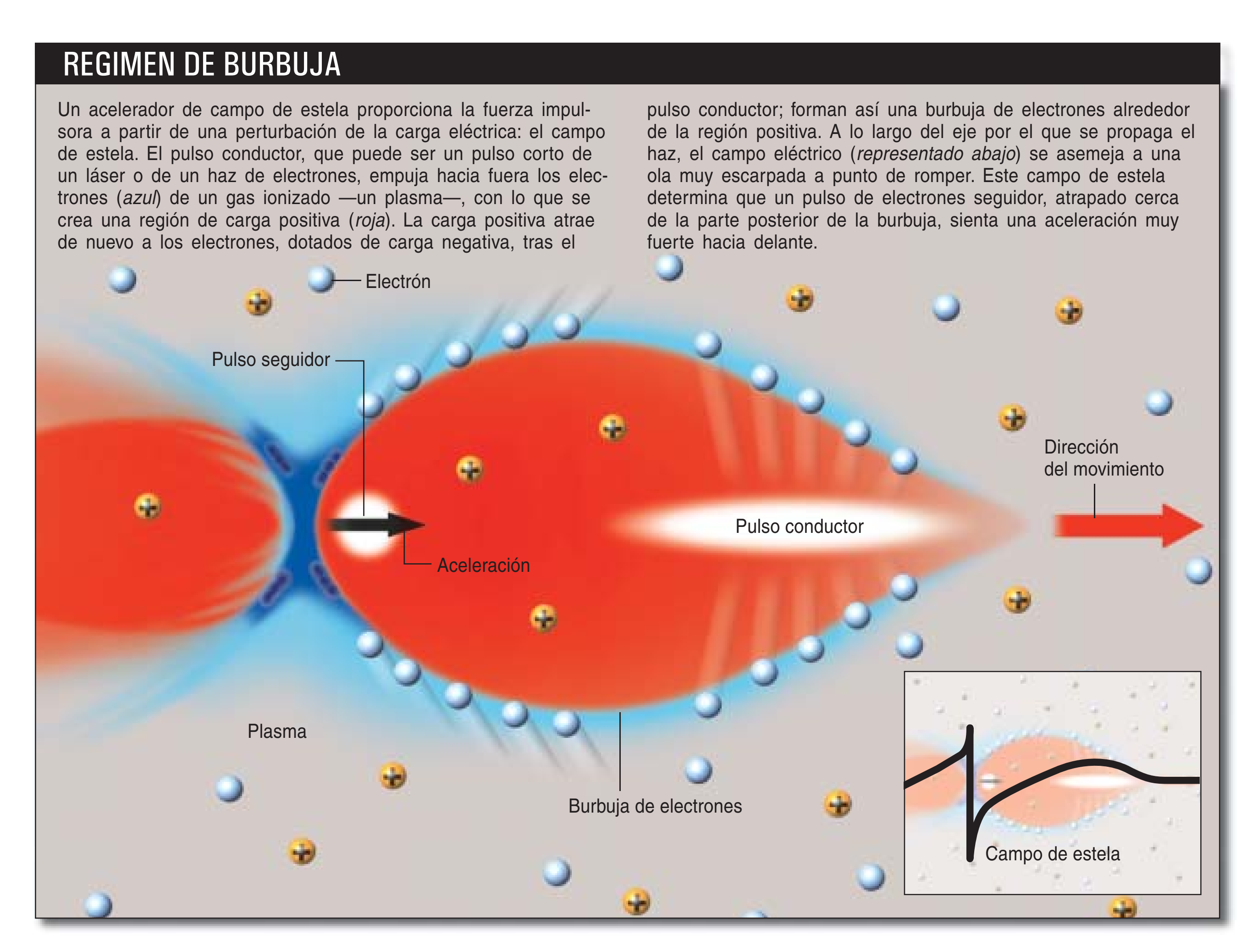
Acelerador de plasma

En un acelerador de plasma, el papel de la estructura aceleradora lo desempeña el plasma, un gas ionizado. La ruptura eléctrica ha dejado de constituir un problema para formar parte del diseño: el gas está "roto" desde el principio (es decir, las cargas positivas y negativas están separadas; por eso es un plasma). La fuente de energía no es la radiación de microondas, sino un rayo láser o un haz de partículas cargadas.

A primera vista, los rayos láser y los haces de partículas cargadas no parecen muy apropiados para la aceleración de partículas. Tienen campos eléctricos muy intensos, pero son perpendiculares, en muy buena medida, a la dirección de propagación. Para que sea eficaz, el campo eléctrico de un acelerador tiene que apuntar en la dirección en que se mueve la partícula. A un campo así se le llama longitudinal. Afortunadamente, cuando se envía un láser o un haz de partículas cargadas a través de

Resumen/Surf en olas de plasma

- Los colisionadores de partículas se valen, desde hace decenios, de cavidades de microondas para propulsar haces de partículas a casi la velocidad de la luz. Este método, cuyo máximo ejemplo va a ser el Gran Colisionador de Hadrones, de 8,6 kilómetros de diámetro, está alcanzando sus límites técnicos y económicos.
- Una nueva técnica, en la que los electrones o positrones aumentan su energía montados sobre una onda de un gas ionizado (es decir, un plasma), promete reducir radicalmente el tamaño y coste de los aceleradores de altas energías utilizados por los físicos de partículas para estudiar, entre otras cuestiones, el origen de la masa del universo. Se ha llevado ya a la práctica en pequeños experimentos de laboratorio.
- Las máquinas de plasma permitirán también la construcción de aceleradores de sobremesa para una amplia gama de aplicaciones que requieren energías menores, en campos muy diversos: la ciencia de materiales, la biología estructural, la medicina nuclear o la esterilización de alimentos.



REGIMEN DE BURBUJA

Un acelerador de campo de estela proporciona la fuerza impulsora a partir de una perturbación de la carga eléctrica: el campo de estela. El pulso conductor, que puede ser un pulso corto de un láser o de un haz de electrones, empuja hacia fuera los electrones (*azul*) de un gas ionizado —un plasma—, con lo que se crea una región de carga positiva (*roja*). La carga positiva atrae de nuevo a los electrones, dotados de carga negativa, tras el pulso conductor; forman así una burbuja de electrones alrededor de la región positiva. A lo largo del eje por el que se propaga el haz, el campo eléctrico (*representado abajo*) se asemeja a una ola muy escarpada a punto de romper. Este campo de estela determina que un pulso de electrones seguidor, atrapado cerca de la parte posterior de la burbuja, sienta una aceleración muy fuerte hacia delante.

GEORGE RETSECK

un plasma, la interacción con éste puede crear un campo eléctrico longitudinal.

Ocurre de esta manera: un plasma, en su totalidad, es eléctricamente neutro; contiene tanta carga negativa (electrones) como positiva (iones). Un pulso intenso de un láser o de un haz de partículas, sin embargo, crea una perturbación en el plasma; el haz empuja los electrones y los separa de los iones positivos, más pesados, que se quedan atrás, creándose así una región de exceso de carga positiva y una región de exceso de carga negativa (*véase el recuadro* “Régimen de burbuja”). La perturbación forma una onda que se propaga por el plasma casi a la velocidad de la luz. El potente campo eléctrico que apunta de la región positiva a la negativa acelerará cualquier partícula dotada de carga que caiga bajo su influencia.

Un plasma puede albergar campos eléctricos aceleradores de una intensidad extraordinaria. Un plasma que contenga 10^{18} electrones por centímetro cúbico (cuantía que no es excepcional), generará una onda con un campo eléctrico máximo de 100.000 millones de volt por metro; multiplica por más de mil el gradiente de aceleración en un acelerador de los comunes, de microondas. Ahora viene el problema: la longitud de onda de una onda del plasma es sólo de 30 micras, mientras que la longitud de onda de las microondas es del orden de 10 centímetros. Resulta muy difícil colocar un paquete de electrones en una onda microscópica.

La idea de acelerar las partículas con plasmas se la debemos a John M. Dawson; la propuso en 1979. Pasó más de una década antes de que los experimentos demostraran que los electrones podían ir montados en una onda en el plasma y ganar energía con ello. Se tienen que controlar tres técnicas diferentes —de los plasmas, los aceleradores y los láseres— y conseguir que actúen a la vez. Mi grupo de la Universidad de California en Los Angeles (UCLA) lo logró, de manera inequívoca, en 1993. Desde entonces, el progreso en este campo ha sido enorme. Dos técnicas en particular, el acelerador de campo de estela de láser y el acelerador de campo de estela de plasma, están dando resultados espectaculares. Parece que con el campo de estela de láser se podrá construir un acelerador de sobremesa de baja energía, y con el campo de estela de plasma, en el futuro, un acelerador con energías como las que necesita la física de partículas.

Pulsos de luz

Los aceleradores “portátiles” de plasma son posibles gracias a los láseres intensos y pequeños de hoy. Láseres de titanio-zafiro que generan 10 terawatt (billón de watt) de potencia en pulsos de luz ultracortos caben ahora en una mesa grande [*véase* “Luz extrema”, por Gerard A. Mourou y Donald Umstadter; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 2002].

En los aceleradores de plasma alimentados por láser, se enfoca un pulso de láser ultracorto sobre un

chorro de helio de un par de milímetros de largo. El pulso arranca inmediatamente los electrones del gas, que se convierte en un plasma. La presión de radiación de ese disparo del láser es tan grande, que los electrones, mucho más ligeros que los iones, salen despedidos en todas direcciones. No van muy lejos: los iones los vuelven a arrastrar hacia dentro. Cuando alcanzan el eje por donde se propaga el pulso del láser, lo superan y acaban viajando de nuevo hacia fuera. Se produce así una onda oscilante, el campo de estela de láser; recibe tal apelativo porque sigue el pulso del láser como la estela sigue al barco.

Los electrones forman una estructura en burbuja. Cerca del frente de la burbuja se halla el pulso del láser que crea el plasma; en el interior, los iones del plasma. Esta burbuja es microscópica, con unas 10 micras de diámetro. El campo eléctrico de la región de la burbuja se asemeja a una ola, aunque mucho más escarpada. Caben otras estructuras, pero la burbuja parece ofrecer la manera más fiable de acelerar electrones.

Si un dispositivo, un cañón de electrones por ejemplo, introduce un electrón externo cerca de donde haya un exceso de electrones en el plasma, esa partícula añadida experimentará un campo eléctrico que tirará de ella hacia las cargas positivas del interior de la burbuja. La onda avanza casi a la velocidad de la luz, de manera que hay que inyectar el electrón a una celeridad semejante, para que coincida con la onda y obtenga energía de ella. Sabemos por la teoría de la relatividad que cualquier aumento adicional de energía del electrón vendrá de un aumento de la masa de la partícula, no de su velocidad. El electrón, por tanto, no acabará adelantándose mucho a la onda de plasma: irá montado sobre ella y ganará así constantemente energía. Algunos de los electrones del propio plasma también quedarán atrapados y se acelerarán de esa misma manera, como la espuma de la cresta de una ola.

En 2002 Victor Malka y su grupo, en el Laboratorio de Optica Aplicada de la Escuela Politécnica de París, mostraron que se podía generar un haz de 10^8 electrones usando un campo de estela impulsado por láser. El haz estaba bien colimado, es decir, bien enfocado. Desafortunadamente, los electrones acelerados tenían una gama muy amplia de energías, desde uno a 200 megaelectronvolt (MeV). La mayoría de las aplicaciones requieren un haz de electrones donde todos porten la misma energía.

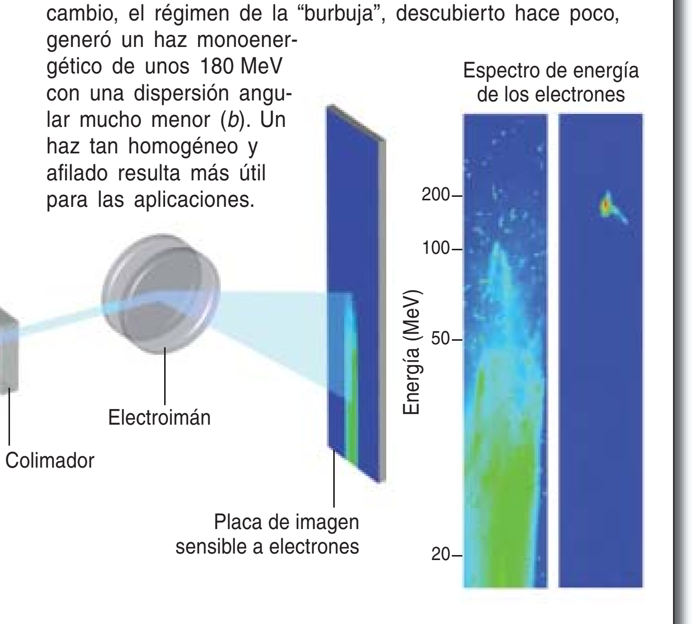
Esta dispersión de energías ocurría porque los electrones eran atrapados por la onda del campo de estela en varios puntos y en tiempos distintos. En un acelerador común, las partículas que se han de acelerar se inyectan en un solo lugar, cerca del pico del campo eléctrico. El grupo de Malka pensó que una inyección tan exacta era imposible en un acelerador de campo de estela de láser porque su estructura aceleradora es microscópica y de breve duración.

Pero el azar acabó con la aporía. En 2004 tres grupos que competían entre sí, de Estados Unidos, Francia y el Reino Unido, se encontraron al mismo tiempo con un nuevo régimen físico, en el cual los electrones autoatrapados se deslizaban sobre el plasma como un solo grupo; así, todos alcanzaban la misma energía. Los tres grupos utilizaron láseres de potencia mayor que en experimentos anteriores: de 10 terawatt en adelante. Cuando un pulso de láser tan potente

ACELERADOR DE CAMPO DE ESTELA POR LASER

Un acelerador de plasma de sobremesa enfoca un rayo láser de alta intensidad sobre un chorro supersónico de helio gaseoso (*izquierda*). Un pulso del haz produce un plasma en el chorro del gas; el campo de estela acelera algunos de los electrones desalojados. El pulso de electrones que resulta se colima y atraviesa un campo magnético, que desvía los electrones en diversos grados según sea su energía. Todo el acelerador puede caber en un banco óptico de un metro veinte por uno ochenta.

Los haces de electrones (*paneles de la derecha*) generados por el primer acelerador de sobremesa, en el Laboratorio de Optica Aplicada de la Escuela Politécnica de París, ilustran cómo se superó uno de los principales obstáculos importantes. Algunos de los electrones se aceleraron hasta los 100 MeV, pero los había de todas las energías, hasta 0 MeV (*a*). Además, el haz divergía en casi un grado. En cambio, el régimen de la “burbuja”, descubierto hace poco, generó un haz monoenergético de unos 180 MeV con una dispersión angular mucho menor (*b*). Un haz tan homogéneo y afilado resulta más útil para las aplicaciones.

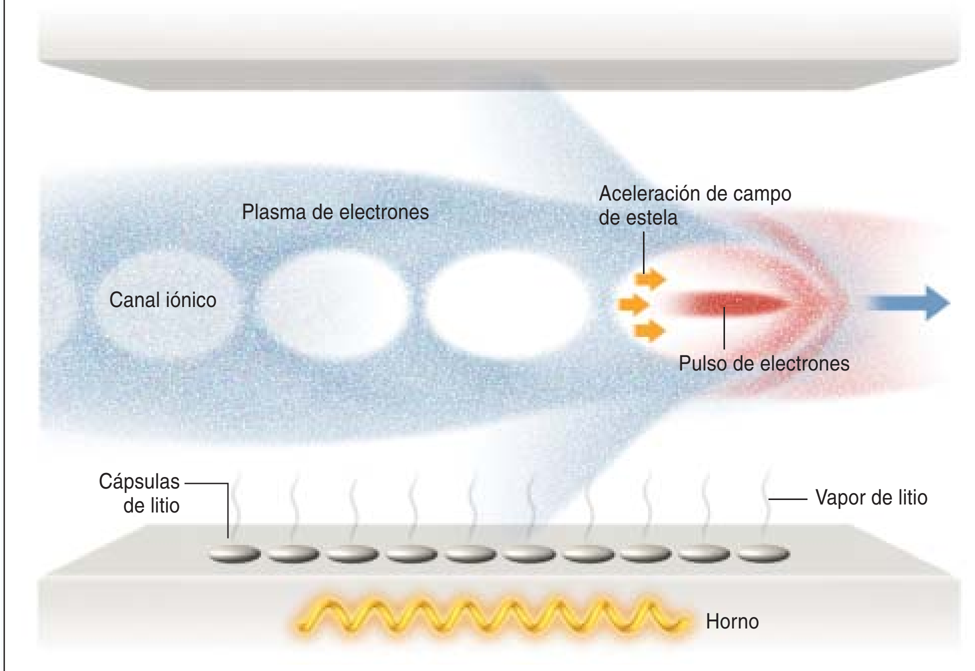


GEORGE RETSECK (*ilustración*); FUENTE: VICTOR MALKA (*espectro*)

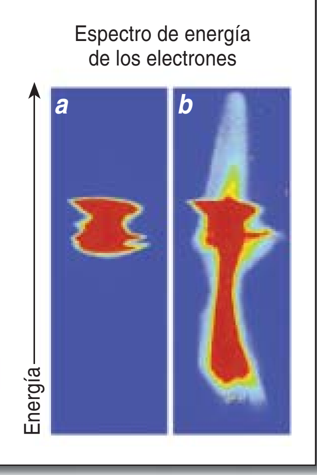
DISPOSITIVOS DE POSCOMBUSTION DE PLASMA

Se ha llevado a cabo recientemente la aceleración experimental de campo de estela de plasma. Se utilizó un haz del Colisionador Lineal de Stanford (SLC). El acelerador agregó 4 GeV de energía a un haz de electrones en apenas 10 centímetros, aumento de energía que hubiera requerido un tramo de 200 metros de un acelerador de microondas.

Un horno vaporizó cápsulas de litio. Un pulso intenso de electrones (*rojo*) ionizó el vapor para producir un plasma. El pulso expulsó los electrones del plasma (*azul*), donde se estableció entonces un campo de estela —una perturbación de carga— detrás del pulso. Los electrones situados en dicho campo de estela experimentaron una potente aceleración (*flechas naranja*).



En ausencia del litio (*a*), el haz de 30 GeV del SLC era bastante monoenergético (la energía se representa en el eje vertical). Después de pasar por 10 centímetros de plasma de litio (*b*), la mayoría de las partículas del haz perdieron energía en la generación del campo de estela del plasma (*cola roja*). El campo de estela acelera un pequeño número de electrones que estaban en la parte posterior del pulso hasta una energía más alta (*región azul superior*).



GEORGE RETSECK (*ilustración*); CENTRO DEL ACELERADOR LINEAL DE STANFORD, UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA, LOS ANGELES Y UNIVERSIDAD DEL SUR DE CALIFORNIA (*espectro*)

se propaga a través del plasma, se hace a la vez más corto y más estrecho; de ese modo se crea una gran burbuja electrónica que atrapa los electrones del plasma. Estos electrones autoatrapados son tan numerosos, que extraen una considerable cantidad de energía de la estela, con lo que impiden más atrapamientos. Los de más alta energía van dejando atrás la estela, pero entonces empiezan a perder energía; mientras tanto, los electrones rezagados, de energía más baja, todavía la están ganando.

El resultado es un haz de electrones con poca dispersión de energías. En los experimentos de Malka, la dispersión de energía se redujo de un 100 por ciento a sólo un 10 por ciento, con hasta 10^9 electrones por haz. La dispersión angular del haz fue también mucho más angosta que en experimentos anteriores, comparable con los mejores haces producidos por los aceleradores lineales de microondas. El haz de electrones generado (en realidad un pulso) tenía una longitud de sólo 10 femtosegundos (10^{-14} segundos), el más corto jamás producido por un acelerador, lo que lo hacía atractivo como potencial fuente de radiación para la resolución de procesos químicos y biológicos ultrarrápidos. El pulso de electrones se podía dirigir sobre un blanco de metal delgado para crear un pulso de rayos X de análoga brevedad. Espero que en uno o dos años veamos aplicaciones de rayos X provenientes de aceleradores de sobremesa.

¿Cómo se puede aumentar aún más la energía del haz de electrones, hasta obtener un acelerador de campo de estela de láser de mil millones de electronvolt (GeV)? Habría que crear una onda de plasma que persistiese sobre una distancia de cerca de un centímetro y no ya de sólo un par de milímetros. El rayo láser que excita la onda, por tanto, debería mantener una intensidad elevada en el plasma durante un tiempo más largo; para ello debería servirle de guía una "fibra de plasma". Un método muy prometedor consiste en usar una fibra de plasma preformada; se está intentando en el Laboratorio Nacional Lawrence de Berkeley. En este procedimiento, los electrones tienen una densidad más baja a lo largo del eje del plasma. Por eso, el canal del plasma presenta un índice de refracción más alto a lo largo de su eje que en sus bordes, justo la condición apropiada para que el canal actúe como una fibra óptica que guíe el rayo láser. Los experimentos de Berkeley han demostrado ya que tales canales generan haces de electrones monoenergéticos. Es probable que otras mejoras del método lleven en un futuro muy cercano al primer acelerador de plasma de sobremesa con energías del orden de los GeV.

Alcanzar la frontera energética

¿Cómo se podría ampliar estos aceleradores de plasma impulsados por

láser de escala centimétrica para que generen las energías del orden del TeV que interesan a los físicos de partículas? Cabría encadenar centenares de pequeños módulos de aceleración de plasma por láser, de manera que cada uno proporcionara un aumento de energía neta de algunos GeV. Combinándose por etapas es como consiguen los aceleradores de microondas tan altas energías. Pero en los aceleradores de plasma, esa arquitectura segmentada presenta enormes complicaciones.

Por eso, hoy se prefiere el método de la "poscombustión" o "posaceleración" de plasma, que con una sola etapa de aceleración de campo de estela de plasma dobla la energía obtenida en un acelerador común. En este método, un acelerador ordinario aporta a dos pulsos de electrones o de positrones energías de varios cientos de GeV. El primer pulso, el "conductor", contiene el triple de partículas que el segundo, el pulso "seguidor". Ambos pulsos duran sólo unos 100 femtosegundos y están separados por otros 100 femtosegundos. Como en un acelerador de campo de estela de láser, cuando el pulso conductor se enfoca hacia el plasma se produce una burbuja de campo de estela (siempre que el haz sea más denso que el plasma). El proceso remeda el del campo de estela de láser, con una salvedad: el campo eléctrico del haz de partículas es el que empuja y no la presión de radiación del rayo láser. La burbuja electrónica contiene el haz seguidor, rápidamente acelerado por la componente longitudinal del campo eléctrico resultante.

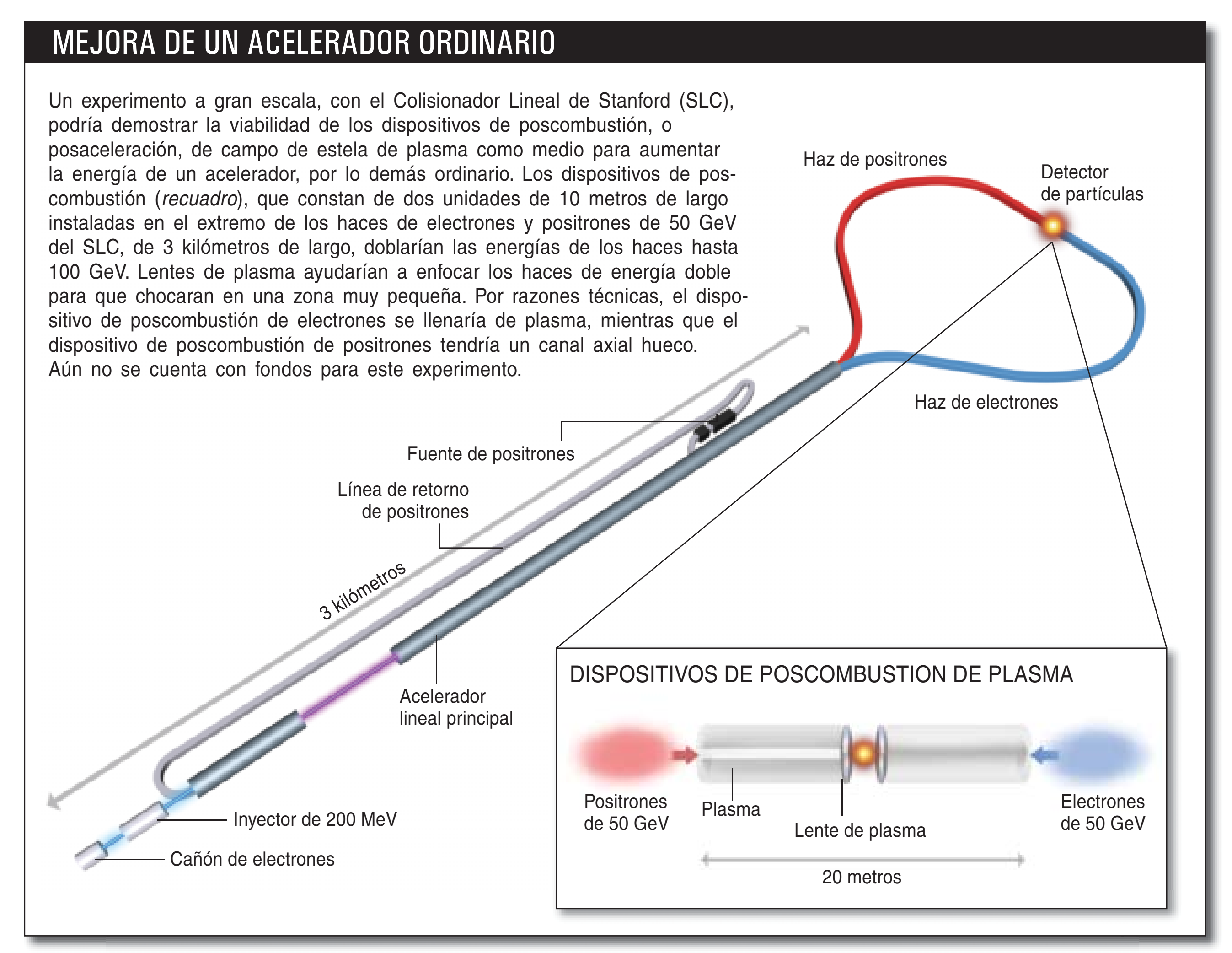
El acelerador de campo de estela de plasma está despertando un gran entusiasmo entre los físicos que trabajan en técnicas avanzadas de aceleración. En particular, tres avances han motivado semejante agitación; en ellos participaron expertos de la UCLA, de la Universidad del Sur de California y del Centro del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC). Se valieron de haces del Colisionador Lineal de Stanford.

Primero, y es lo más importante, consiguieron resolver el problema de que los aceleradores de plasma impulsados por láser tuviesen sólo algunos milímetros de longitud: hicieron un acelerador de plasma de un metro de largo tanto para electrones como para positrones. Con gran habilidad, lograron que los haces conductores se mantuviesen estables sobre una longitud tan larga. En segundo lugar, consiguieron más de 4 GeV de aumento de energía para los electrones en sólo 10 centímetros. Este aumento de la energía estaba limitado solamente por consideraciones prácticas, y no por ningún problema científico; con alargar el plasma, el incremento sería aún mayor.

Finalmente, demostraron que el plasma afilaba aún más un haz ya

MEJORA DE UN ACELERADOR ORDINARIO

Un experimento a gran escala, con el Colisionador Lineal de Stanford (SLC), podría demostrar la viabilidad de los dispositivos de poscombustión, o posaceleración, de campo de estela de plasma como medio para aumentar la energía de un acelerador, por lo demás ordinario. Los dispositivos de poscombustión (*recuadro*), que constan de dos unidades de 10 metros de largo instaladas en el extremo de los haces de electrones y positrones de 50 GeV del SLC, de 3 kilómetros de largo, doblarían las energías de los haces hasta 100 GeV. Lentes de plasma ayudarían a enfocar los haces de energía doble para que chocaran en una zona muy pequeña. Por razones técnicas, el dispositivo de poscombustión de electrones se llenaría de plasma, mientras que el dispositivo de poscombustión de positrones tendría un canal axial hueco. Aún no se cuenta con fondos para este experimento.



GEORGE RETSECK

focalizado de electrones o de positrones; reducía su grosor a la mitad, si no más. La mejora es significativa para un colisionador, que debe enfocar las partículas aceleradas sobre un punto muy pequeño. Cuanto más estrechos sean los haces, más colisiones se producirán. Y en un colisionador, el ritmo de colisiones constituye un parámetro determinante, del mismo rango que la energía total.

Estos avances han movido a pensar en la posibilidad de llevar el método del plasma hasta la frontera de las altas energías, pero primero habrá que probar con un acelerador de los ya disponibles. Se podrían instalar un par de dispositivos de campo de estela de plasma a ambos lados del punto de colisión del Colisionador Lineal de Stanford. Eso doblaría las energías de los haces, de los actuales 50 GeV a 100 GeV. Cada dispositivo de poscombustión de plasma tendría unos 10 metros de largo. Aunque no hay fondos asignados todavía para tal proyecto, el SLAC ha propuesto al Departamento de Energía la construcción de una línea de haz de alta energía llamada SABER a fin de impulsar esta investigación.

He descrito estos aceleradores de plasma tan sólo como aceleradores de electrones. A fin de acelerar partículas cargadas positivamente, como los positrones, el campo eléctrico debe invertirse. Para ello, se establece que el pulso conductor sea de positrones. La carga positiva de este haz dirige los electrones del plasma hacia dentro; igual que antes, superan el eje central y forman una burbuja. La dirección del campo eléctrico se invierte en comparación con la configuración del haz de electrones descrita, tal y como se requiere para acelerar un haz seguidor de positrones.

Además, estas máquinas de plasma pueden acelerar partículas más pesadas, protones por ejemplo. Para ello, las partículas inyectadas deben viajar a casi la velocidad de la luz, de manera que la onda del plasma no las deje atrás. En el caso de los protones, significa que la energía de inyección ha de ser de varios GeV.

Son rápidos los progresos en pos de un acelerador de plasma. Aunque muchos de los problemas físicos fundamentales están solucionados, la realización de dispositivos prácticos todavía plantea dificultades formidables. En particular, la calidad del haz, la eficiencia (la parte de la energía del haz conductor que acaba en las partículas aceleradas) y las tolerancias de alineación (los haces se deben alinear con precisión de nanómetros con el punto de colisión) todavía no son las adecuadas. Finalmente, cuenta también el ritmo de repetición del dispositivo (cuántos pulsos se aceleran por segundo).

Llevó 75 años a los aceleradores comunes alcanzar energías de colisión electrón-positrón del orden de los 200 GeV. Los aceleradores de plasma están progresando a un ritmo mucho más rápido. Se espera que en diez o veinte años superen a los sistemas de microondas en la física de altas energías. Mucho antes, se tendrán gracias al campo de estela de láser aceleradores de sobremesa con energías del orden de los GeV para una rica variedad de aplicaciones.

El autor

Chandrashekhar Joshi es profesor de ingeniería eléctrica en la Universidad de California en Los Angeles. Dirige allí el centro de electrónica de alta frecuencia y el laboratorio Neptuno de técnicas de aceleración avanzadas.

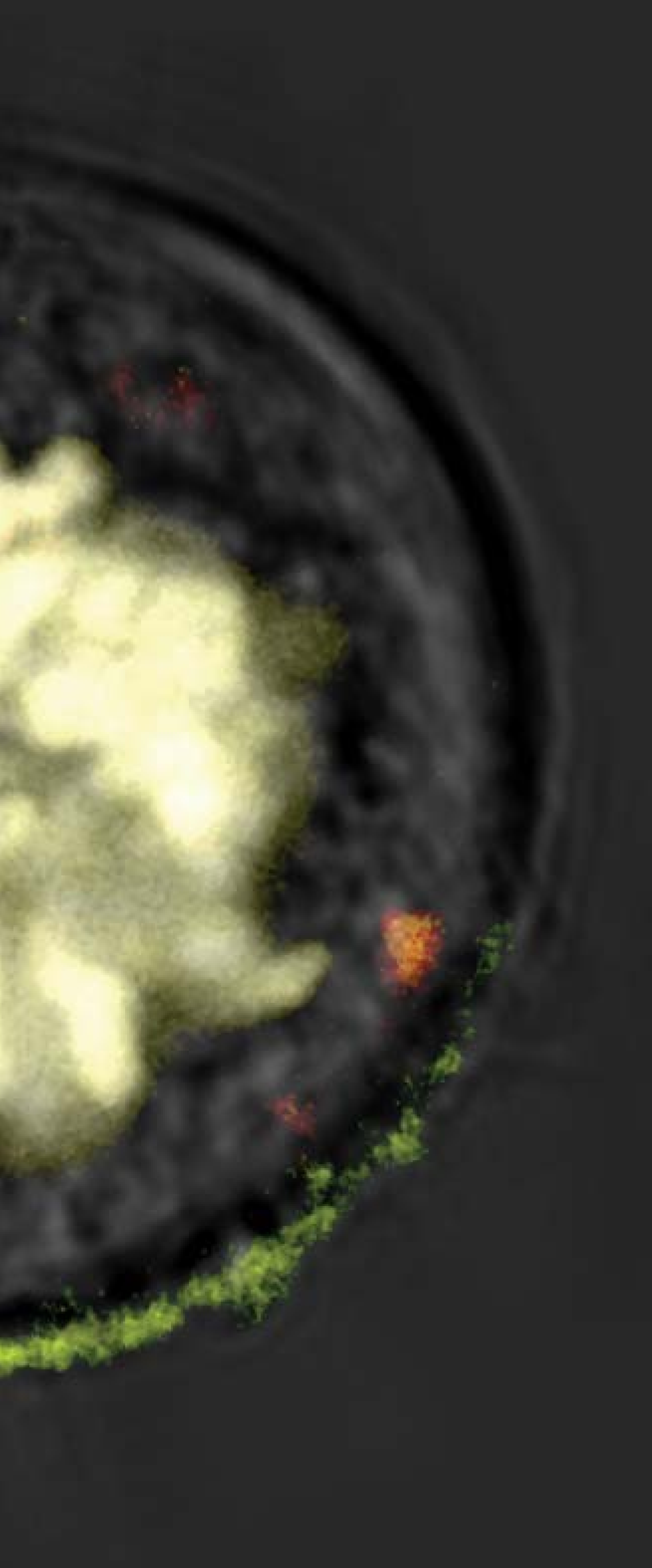
Bibliografía complementaria

ACELERADORES DE PARTÍCULAS MEDIANTE PLASMA. John M. Dawson en *Investigación y Ciencia*, n.º 152, págs. 26-34; mayo 1989.

PLASMA ACCELERATORS AT THE ENERGY FRONTIER AND ON TABLETOPS. Chandrashekhar Joshi y Thomas Katsouleas en *Physics Today,* vol. 56, n.º 6; págs. 47-53; junio 2003.

ACCELERATOR PHYSICS: ELECTRONS HANG TEN ON LASER WAKE. Thomas Katsouleas en *Nature,* vol. 431, págs. 515-516; 30 de septiembre 2004.


Sinapsis
inmunitaria



Las imágenes de la interacción entre células inmunitarias muestran conexiones semejantes a las que entablan las neuronas para comunicarse. El estudio de estas sinapsis arroja luz sobre las redes de intercambio de información que las células tejen para combatir las enfermedades

Daniel M. Davis

1. LAS PROTEINAS (*amarillo*) se aglutinan en el punto de contacto entre dos células inmunitarias, donde se produce el intercambio de información. Las proteínas de la sinapsis en cuestión indican a una célula asesina natural (*abajo, izquierda*) que la célula B (*derecha*) se encuentra sana y, por tanto, no debe eliminarse. Para las células que no superan la prueba, la célula asesina natural dispone de orgánulos ácidos (*rojo*), prestos a desplazarse hacia la sinapsis y descargar una inyección letal.

Los aficionados a las historietas gráficas saben que los relatos más solicitados son aquellos en los que un superhéroe aparece por primera vez. En fecha reciente, un cuaderno de esos tebeos publicado en 1962 donde se mostraba la primera aparición de Spiderman se vendió en una subasta por 122.000 dólares. Lamentablemente, las publicaciones que describen un descubrimiento científico de importancia no alcanzan tales precios. Para los científicos, sin embargo, estas primicias tienen un gran valor.

Tomemos el ejemplo de lo ocurrido en 1995, cuando Abraham “Avi” Kupfer, del Centro Médico y de Investigación Nacional Judío de Denver, se plantó ante un confiado grupo de varios centenares de inmunólogos que acudían a una de las conferencias Keystone. La presentación de Kupfer incluía las primeras imágenes tridimensionales de células inmunitarias en mutua interacción. Los congregados seguían absortos una exposición en la que Kupfer iba mostrando, una tras otra, imágenes de proteínas que se organizaban y adoptaban el patrón de una diana en el área de contacto entre las células.

La audiencia captó de inmediato el significado inequívoco de las imágenes. A la manera de las sinapsis, que conectan las neuronas en una red de comunicación nerviosa, el contacto entre células inmunitarias se establecía a través de agregados proteicos organizados. Se percibían con nitidez anillos externos de moléculas que mantenían adheridas a las células, así como agregados internos de proteínas en plena interacción, característicos del diálogo intercelular.

Se había propuesto con anterioridad la hipótesis de que las células inmunitarias —que deben intercambiar y almacenar información durante la detección de enfermedades y a la hora de responder ante ellas— podrían compartir mecanismos con las neuronas, consumadas comunicadoras. Por fin, se presentaban pruebas experimentales (información estructural) que concordaban con la teoría. Cuando Kupfer terminó, la sala estalló en un prolongado aplauso. Siguió un aluvión de preguntas.

Un decenio más tarde, la sinapsis inmunitaria sigue planteando interrogantes sobre la generación de la arquitectura sináptica, la regulación de la comunicación intercelular, la aparición de enfermedades debidas a la disfunción de esta comunicación y la explotación de este mecanismo patogénico por parte de agentes patógenos.

El descubrimiento de esta estructura inmunitaria y su posterior exploración no hubieran sido posibles sin las nuevas técnicas de microscopía de alta resolución y el refinamiento informático de los antiguos métodos de formación de imágenes. El saber que un pensamiento, la sensación que provoca una caricia y la detección de un virus en el torrente sanguíneo precisan de una coreografía molecular parecida proporciona un nuevo marco para comprender la inmunidad.

Arquitectura sináptica

La posibilidad de que las células inmunitarias dirigiesen su comunicación resultaba ya evidente mucho antes del descubrimiento de la sinapsis inmunitaria. Se sabía que, para comunicarse entre sí y con otros tipos de células, las inmunitarias segregaban citoquinas. Sin embargo, al menos algunas de estas proteínas no operaban como hormonas, que circulan por todo el cuerpo difundiendo ampliamente su mensaje. En vez de ello, las citoquinas apenas se detectaban en sangre y parecían actuar sólo entre células en contacto.

Esta capacidad para intercambiar señales químicas sólo con un vecino determinado reviste suma importancia para las células inmunitarias. A diferencia de las neuronas, que tienden a formar conexiones estables a largo plazo con otras células, las células inmunitarias establecen contactos fugaces conforme recorren el cuerpo en busca de signos de enfermedad o intercambian información sobre peligros presentes. Cuando una célula inmunitaria encargada de detectar la patología se encuentra con otra célula, dispone de un par escaso de minutos para decidir si su objetivo está sano o no. Si no lo está, la célula inmunitaria, en función del tipo que sea, puede matar directamente a la célula enferma o tocar a rebato para movilizar a otros combatientes del sistema inmunitario, que asumen la tarea. Un error en la comunicación llevaría a las células inmunitarias a matar células sanas, como ocurre en la esclerosis múltiple y otras enfermedades autoinmunitarias, o a permitir que células cancerosas sigan creciendo de forma descontrolada. De ahí el interés de los inmunólogos en averiguar qué moléculas intervienen en estos diálogos y qué mutuas interacciones desarrollan para tomar decisiones de tanta importancia.

A principios de los años ochenta del siglo pasado, expertos del Laboratorio de Inmunología del Instituto Nacional de la Salud (NIH) comenzaron a investigar la posibilidad de que una interfaz estructurada permitiera a las células inmunitarias dirigir su secreción de citoquinas hacia otra célula. Dado que las membranas celulares, formadas sobre todo por lípidos y proteínas, son fluidas, las proteínas se desplazarían con facilidad hacia el punto de contacto entre dos células y formarían allí una arquitectura organizada, como ocurre cuando las neuronas entran en conexión con otra célula.

La hipótesis del grupo del NIH tomó cuerpo a partir de experimentos que demostraban que la agrupación de proteínas específicas en la superficie de células T (células inmunitarias) desencadenaba la activación de éstas. En 1984, Michael A. Norcross,

Resumen/Comunicación estructurada

- Las imágenes de microscopía de alta resolución de células inmunitarias en contacto con otras células han puesto de manifiesto la existencia de estructuras de membrana transitorias, que guardan semejanza con las conexiones sinápticas entre neuronas.
- La investigación sobre la sinapsis inmunitaria se centra en los mecanismos que podrían controlar su configuración y en la modulación de la comunicación intercelular.
- La observación en tiempo real de las interacciones entre células inmunitarias abre una nueva vía para comprender los mecanismos a través de los cuales comparten y procesan la información para defender de la enfermedad al organismo.

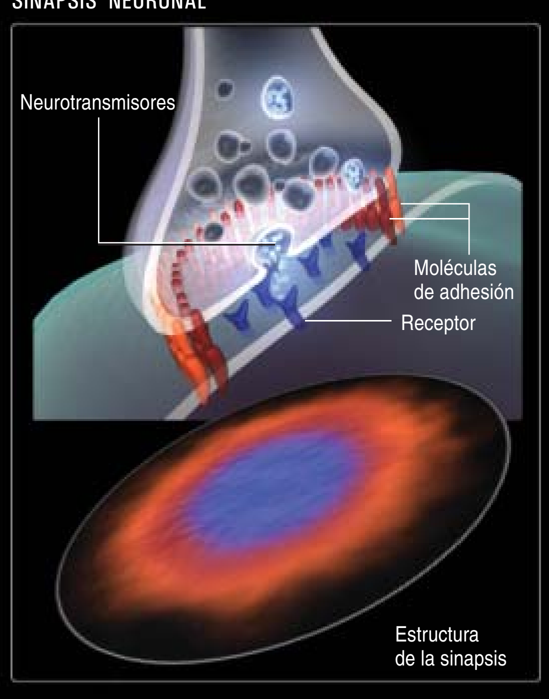
SINAPSIS NEURONAL Y SINAPSIS INMUNITARIA

Derivada de dos palabras griegas que significan “juntar” y “sujetar”, una sinapsis corresponde al punto de contacto por donde dos células intercambian señales moleculares y, con frecuencia, se encuentran físicamente unidas entre sí mediante proteínas enlazadas. Entre neuronas, estas conexiones suelen operar a largo plazo; las células inmunitarias, en cambio, establecen contactos temporales para diálogos rápidos. La configuración de las sinapsis inmunitarias varía en función del tipo de célula; su formación se divide en etapas que quizá regulan la conversación celular.

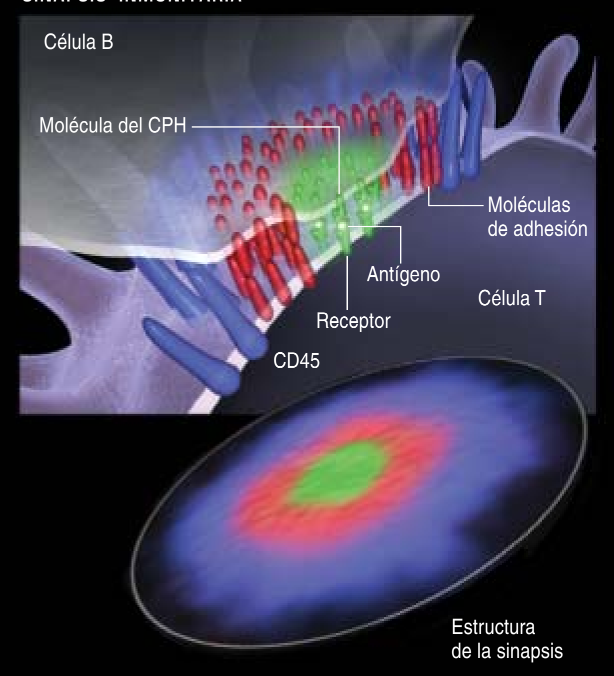
SEMEJANZAS SINAPTICAS

En la sinapsis neuronal, las proteínas de adhesión mantienen muy juntas las membranas de las dos células interactuantes. Cuando se estimula la primera neurona, las vesículas cargadas de neurotransmisores se desplazan hacia la membrana para liberar su contenido, que viaja hacia los receptores localizados en la segunda neurona. En una sinapsis inmunitaria, las moléculas de adhesión mantienen, a su vez, juntas las membranas celulares mientras otras proteínas interaccionan. En este ejemplo, las moléculas del complejo principal de histocompatibilidad (CPH) de una célula B presentan antígenos (fragmentos proteicos) a los receptores de las células T. Las proteínas CD45, que en condiciones normales suprimen la señalización, se relegan hacia la periferia de la sinapsis. Vistas desde el interior de una de las células, las estructuras sinápticas adoptan patrones parecidos a una diana.

SINAPSIS NEURONAL

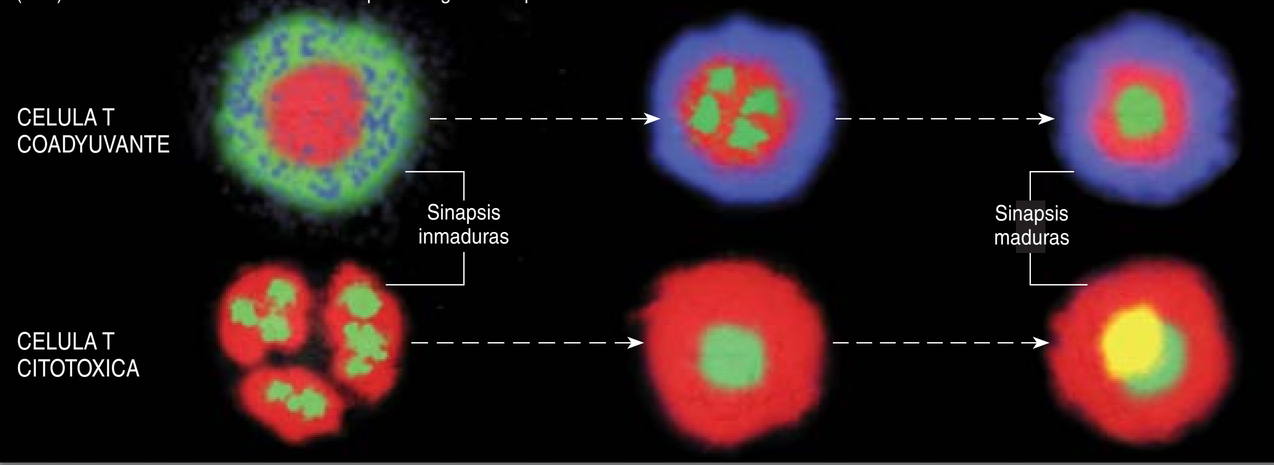


SINAPSIS INMUNITARIA

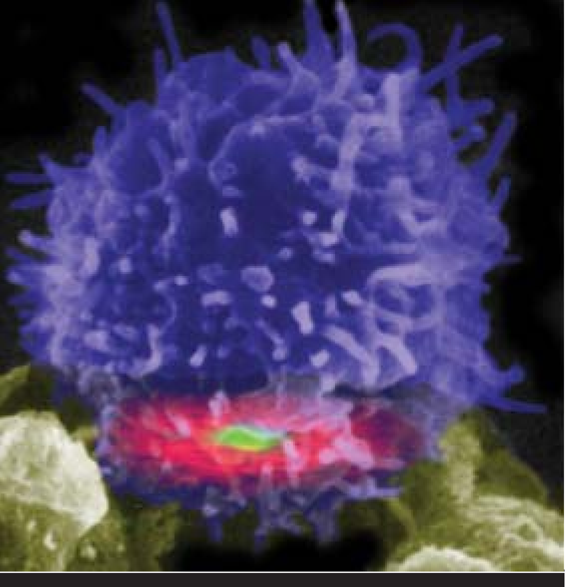


DESARROLLO DINAMICO

La sinapsis de la célula T coadyuvante comienza con moléculas de adhesión (*rojo*) agrupadas en el centro y receptores (*verde*) en un anillo periférico. Este orden se invierte en la sinapsis madura, donde las proteínas CD45 (*azul*) forman el anillo más externo. Otro tipo de célula inmunitaria, la célula T citotóxica, se encarga de matar células enfermas. Cuando se encuentra con una, sus receptores y las proteínas de adhesión comienzan a acumularse; luego forman un anillo. Por fin, los gránulos que contienen las moléculas tóxicas (*amarillo*) se desplazan desde el interior de la célula hacia el centro de la sinapsis para liberar su carga letal. Se está investigando qué función desempeñan estas etapas de la formación de las sinapsis en la regulación de la comunicación entre células inmunitarias.



AMADEO BACHAR



2. LAS CELULAS INMUNITARIAS se ponen en contacto para realizar un intercambio que hará que una célula T (*azul*) se active si reconoce un antígeno presentado por la célula dendrítica de mayor tamaño (*dorado*). En esta micrografía electrónica fusionada con una imagen de fluorescencia de una célula viva, los receptores de las células T que interaccionan con el antígeno se agrupan en el centro de la sinapsis (*verde*); un anillo de moléculas de adhesión (*rosa*) mantiene juntas las dos células.

del NIH, publicó un artículo donde se sugería la posibilidad de que el sistema nervioso y el sistema inmunitario se valieran de un mecanismo común de comunicación mediante sinapsis. Por desgracia, apareció en una revista de poca difusión; además, algunos de los detalles moleculares no estaban incluidos. El primer modelo sináptico de la comunicación entre células inmunitarias se olvidó pronto. Pero permaneció el interés por saber si las células inmunitarias orientaban sus mensajes y cómo lo hacían.

En 1988, Charles Janeway Jr. y sus compañeros de la Universidad de Yale llevaron a cabo un experimento que confirmaba que las células inmunitarias secretaban proteínas en una dirección determinada. Taponaron con células T los poros de una membrana que dividía en dos un compartimento que contenía una disolución. Mediante la adición de un estimulante a sólo uno de los lados de la membrana, activaron las células T, que luego comenzaron a secretar proteínas hacia el origen de la estimulación (no hacia la disolución libre de estimulante), al otro lado de la membrana.

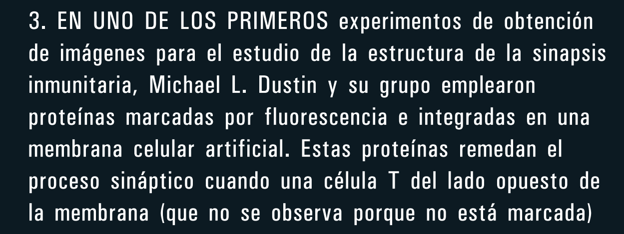
En 1994, animados por esta observación, William E. Paul y Robert A. Seder, del NIH, recuperaron la idea de que la sinapsis inmunitaria correspondía a la conexión que permitía la comunicación entre células inmunitarias y otras células. Según su modelo, la sinapsis constaba de dos superficies celulares muy próximas, con una disposición estructurada de proteínas receptoras en una de las superficies, enfrentadas a sus correspondientes ligandos en la célula adyacente. Dado que las células inmunitarias se desplazan más que las neuronas, Paul se refirió a la sinapsis inmunitaria como una unión "de quita y pon", a diferencia de las conexiones neuronales, a largo plazo.

A mediados de los noventa, la sinapsis inmunitaria se ofrecía como un concepto arriesgado, sin respaldo experimental. Hasta que Avi Kupfer exhibió sus diapositivas en el simposio Keystone. Las imágenes mostraban interacciones entre células presentadoras de antígenos (CPA), células inmunitarias encargadas de degradar las proteínas del agente invasor (un virus, por ejemplo) y mostrar los fragmentos proteicos a las células T, que se activan cuando reconocen uno de tales antígenos. A estas disposiciones proteicas en forma de diana localizadas en la interfaz entre las dos células Kupfer las denominó "complejos supramoleculares de activación" (CSMA).

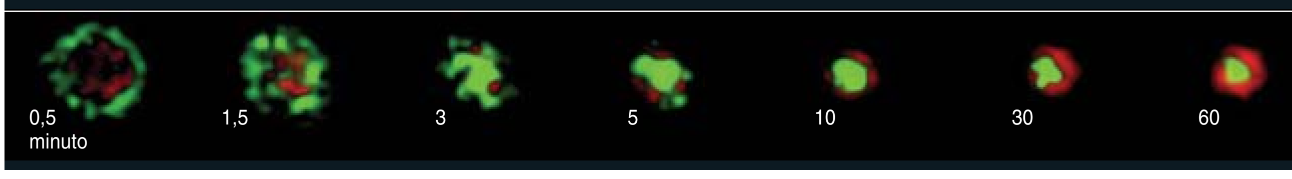
De forma independiente, Michael L. Dustin, Paul M. Allen y Andrey S. Shaw, de la facultad de medicina de la Universidad de Washington en San Luis, junto con Mark M. Davis, de la Universidad de Stanford, habían también obtenido imágenes de la activación de las células T, aunque siguiendo un proceso diferente. En vez de observar la interacción entre dos células, sustituyeron la CPA por un sucedáneo de membrana: una capa de lípidos procedentes de una célula real dispuesta sobre la superficie lisa de un portaobjetos de vidrio. A esta membrana lipídica extendida sobre un soporte de vidrio añadieron las proteínas clave que suelen hallarse en la superficie de las CPA, cada una marcada con un colorante fluorescente de un tono distinto. Contemplaron entonces la organización de las proteínas marcadas conforme las células T se depositaban sobre la membrana.

El grupo de Dustin detectó, asimismo, la aparición de patrones de proteínas con forma de diana a medida que las células T sondeaban las proteínas de la falsa membrana. Quedaba claro que la formación de una sinapsis estructurada no requería la intervención de dos células; bastaba con que una célula inmunitaria entrara en contacto y reaccionara ante una estructura proteica artificial.

Este trabajo puso de manifiesto el carácter dinámico de la sinapsis: la disposición de las proteínas cambia

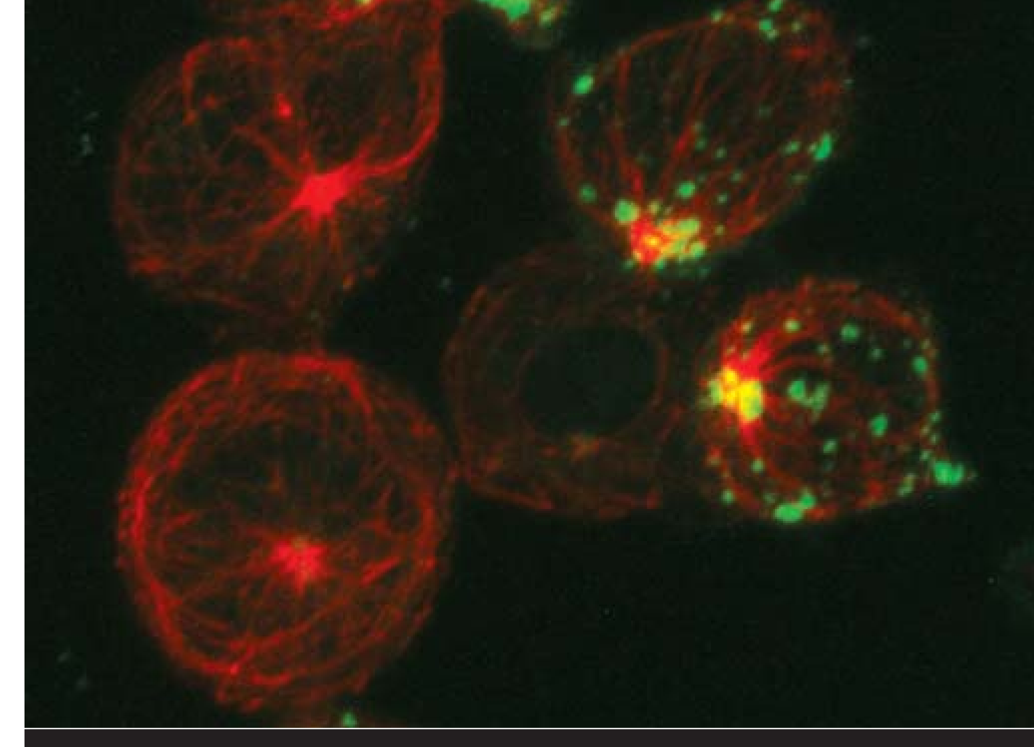


3. EN UNO DE LOS PRIMEROS experimentos de obtención de imágenes para el estudio de la estructura de la sinapsis inmunitaria, Michael L. Dustin y su grupo emplearon proteínas marcadas por fluorescencia e integradas en una membrana celular artificial. Estas proteínas remedan el proceso sináptico cuando una célula T del lado opuesto de la membrana (que no se observa porque no está marcada) empieza a interaccionar con ellas. Primero, las proteínas portadoras de una molécula tipo antígeno (*verde*) forman un anillo externo, con moléculas de adhesión (*rojo*) agrupadas en el interior. En el transcurso de 60 minutos, su disposición se invierte en un proceso que remeda la interacción que tiene lugar en una sinapsis entre células T y células presentadoras de antígenos reales.



a medida que progresa la comunicación entre células. Se observó que los receptores de las células T que interaccionan con los antígenos se acumulaban primero formando un anillo alrededor de un complejo central de proteínas de adhesión, creando una sinapsis inmadura de las células T. Luego, esa estructura se invertía, de forma que en la sinapsis madura las moléculas de adhesión formaban un anillo externo de la diana, alrededor de un complejo central de receptores de células T en plena interacción.

Desde que Kupfer y Dustin publicaron sus primeras imágenes de la sinapsis de las células T, se han observado diversos patrones de estructuras sinápticas entre otros tipos de células inmunitarias. En 1999, el propio autor, cuando trabajaba con Jack Strominger, de la Universidad de Harvard, descubrió una sinapsis estructurada formada por una célula asesina natural (célula AN), un tipo distinto de leucocito; este hallazgo respaldaba la generalidad de las primeras observaciones. El estudio de la formación de dichas estructuras moleculares dinámicas y del control de la comunicación entre células inmunitarias define la nueva ciencia que ha surgido del concepto de sinapsis inmunitaria.



4. DOS CELULAS T ASESINAS (*derecha*) se disponen a destruir una célula enferma (*centro*). Proteínas líticas tóxicas (*verde*) se concentran en las sinapsis establecidas entre las células T y sus presas, transportadas hasta allí mediante microtúbulos (*rojo*), proteínas del citoesqueleto. Las proteínas líticas se inyectarán en la célula diana a través de la parte central de las estructuras sinápticas, que pueden también evitar que las células T se autoenvenenen.

JANE C. STINCHCOMBE Y GILLIAN M. GRIFFITHS *Universidad de Oxford*

Coreografía molecular

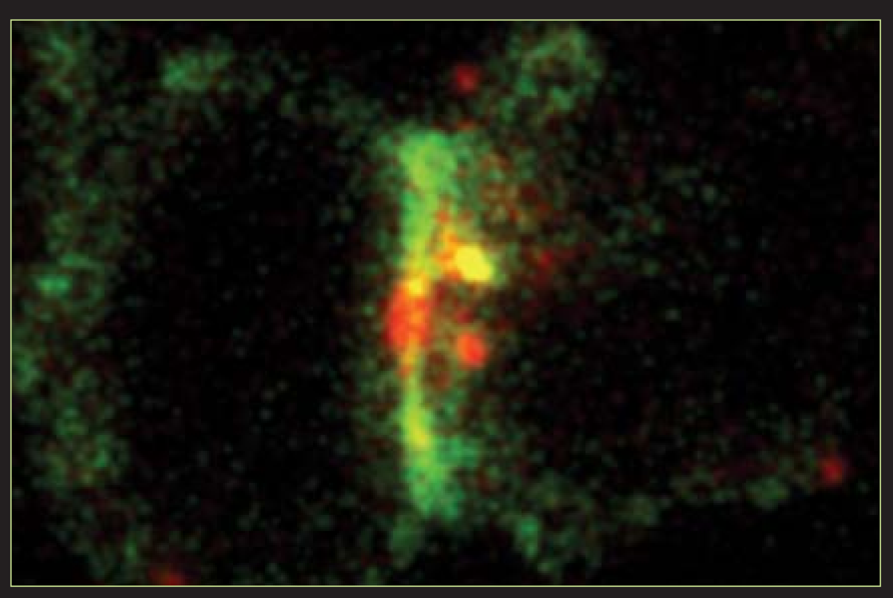
Las observaciones de la estructura de las sinapsis inmunitarias incitaron enseguida a los expertos a investigar qué insta a las proteínas celulares a moverse hacia los puntos de contacto entre las células y a organizarse formando patrones específicos. Uno de los coordinadores de los movimientos de las proteínas presente en todas las células es el citoesqueleto, un entramado de filamentos que consta de largas cadenas proteicas cuya longitud puede aumentar o disminuir. Anclado a la superficie de la célula mediante proteínas adaptadoras, el citoesqueleto empuja o tira de la membrana celular, haciendo que los músculos se contraigan o que los espermatozoides naden.

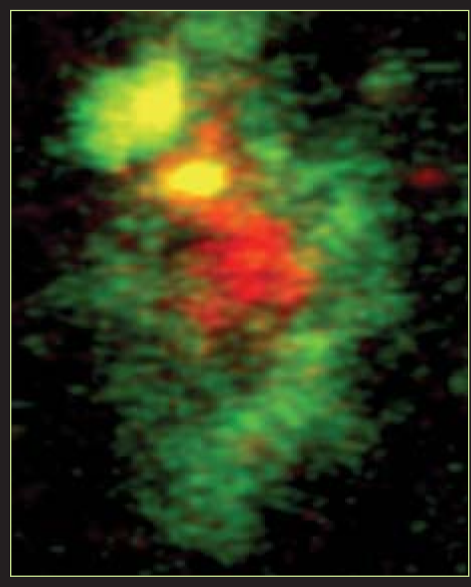
Los experimentos demostraron que, cuando se inutilizaba con toxinas el citoesqueleto, algunas proteínas perdían la capacidad de desplazarse hacia la sinapsis inmunitaria. Ello sugería que las células controlan dónde y cuándo se acumulan las proteínas en la sinapsis mediante el movimiento de los filamentos del citoesqueleto.

Se han propuesto otros dos mecanismos que participarían en la organización de las proteínas en la sinapsis. Según un modelo, habría pequeñas plataformas, formadas por unas cuantas proteínas, que se agruparían en las membranas celulares y se desplazarían juntas por la superficie celular, con la ayuda del citoesqueleto. Cuando estas “balsas” moleculares se reúnen en la sinapsis con las proteínas receptoras clave que detectan la enfermedad en una célula vecina, su interacción activaría a la célula inmunitaria. Pero la existencia de estas plataformas no se halla exenta de controversia. Debido a su tamaño reducido, resultan invisibles al microscopio óptico, razón por la cual las pruebas disponibles de su existencia son indirectas.

De acuerdo con otro modelo, que goza de apoyo directo e indirecto, el tamaño de cada tipo de proteína sináptica resulta crítico a la hora de decidir hacia dónde se dirige cuando las células establecen contacto. Conforme las proteínas de una célula se unen con sus homólogas en la célula opuesta, las dos membranas celulares se acercarán y el espacio que quede entre ellas corresponderá al tamaño de las proteínas unidas. Así, un complejo central de proteínas pequeñas acercaría las membranas lo suficiente como para excluir a proteínas de mayor tamaño; de esta forma, iría segregando distintos tipos de proteínas hacia diferentes regiones de la sinapsis.

El grupo que dirige Arup K. Chakraborty, de la Universidad de California en Berkeley, utilizó un modelo matemático para comprobar esta idea. Estimaron los efectos de la interacción de proteínas de tamaño distinto a través de las membranas de dos células en oposición. Aunque Chakraborty no es inmunólogo sino matemático, se sintió fascinado cuando un compañero le mostró las imágenes de Dustin: allí aparecían unos curiosos patrones espaciales, formados quizá por sus propias células inmunitarias siempre que enfermaba de gripe. De los resultados del estudio se desprende que la diferencia de tamaño entre las proteínas resultaría suficiente para hacer que proteínas de tamaño inferior y superior se agruparan en distintas regiones de la sinapsis inmunitaria.





5. CONFORME UN VIRUS de la leucemia de células T humanas (HTLV) (*rojo*) pasa de una célula T infectada a una célula T sin infectar (*de derecha a izquierda, arriba*), se observa la concentración de la molécula de adhesión talina (*verde*) allí donde entran en conexión las membranas celulares. Visto desde el interior de la célula T infectada (*derecha*), el parecido de la estructura con una sinapsis inmunitaria sugiere que el HTLV, el VIH y otros virus que atacan a las células inmunitarias podrían servirse de los mecanismos de comunicación celular para propagarse de una célula a otra.

En 2002, Kupfer, hoy en la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins, observó que la señalización entre células T y células presentadoras de antígenos antes de que comenzaran a tomar forma los complejos supramoleculares de activación promovía la adhesión entre las dos células; sin embargo, se requería un CSMA para que la interacción entre las células desencadenara la respuesta de las células T.

Los grupos encabezados por Shaw y Allen, con Dustin, han demostrado que la señalización eficiente entre células T y CSMA comienza antes de que los receptores de las células T se hayan agrupado en su instalación final en el centro de la sinapsis. De hecho, parte de la comunicación tiene lugar antes de que se forme la estructura madura, lo que implica que el patrón de la sinapsis madura podría indicar el final de la conversación.

Estos y otros expertos han venido también explorando qué función podría desempeñar la arquitectura sináptica en la regulación del volumen de los diálogos entre las células T y las CPA. Mediante la reducción del número de receptores de la superficie de la membrana durante la señalización, las células T evitan una sobreestimulación letal provocada por un exceso de antígeno. Los experimentos han demostrado que las células T reducen el número de receptores presentes en la sinapsis para amortiguar la señalización; cuando se dispone de sólo una pequeña cantidad de antígeno, las células T pueden agrupar más estrechamente sus receptores en el interior de la sinapsis para amplificar la señal.

El grupo que dirige el autor ha estudiado fenómenos similares en las células asesinas naturales, un tipo de células inmunitarias que buscan y destruyen células dañadas ya por una mutación cancerígena o por la infección de un patógeno. Las células enfermas pierden la expresión de algunas proteínas en su superficie; las células AN identifican esta pérdida como una señal de enfermedad. Han observado que la cantidad de estas proteínas presente en la célula diana influye sobre el patrón de sinapsis inmunitaria que forma la célula AN. Distintos patrones muestran correlación con la decisión última de la célula asesina de matar o no a la célula diana; por tanto, los patrones pueden transmitir, o al menos reflejar, una información que la célula AN utiliza para determinar la gravedad de la enfermedad de la célula diana.

Amén de arrojar luz sobre las funciones de la sinapsis inmunitaria, los nuevos hallazgos han puesto sobre el tapete ciertos fenómenos preocupantes: se ha descubierto que el VIH y otros virus aprovechan la coreografía molecular que articula la comunicación entre células inmunitarias. El equipo que dirige Charles R. M. Bangham, del Colegio Imperial de Londres, demostró que en los puntos de contacto entre células, por donde atraviesan las partículas víricas, las proteínas se agregan creando una estructura que recuerda a la sinapsis inmunitaria. Desde entonces, se han observado fenómenos similares de "sinapsis víricas". Parece que los virus, que se caracterizan por secuestrar la maquinaria celular y ordenarla a la replicación de su propio genoma, se apropian también de los mecanismos celulares de comunicación para pasar de una célula a otra.

Semejanzas sinápticas

El descubrimiento de la sinapsis inmunitaria ha desencadenado un alud de investigaciones que basculan sobre las imágenes de interacciones entre células inmunitarias. Aunque los resultados de estos trabajos carecen todavía de una interpretación satisfactoria, brotan sin cesar nuevas hipótesis y se acometen investigaciones para comprobarlas. La misma idea de la sinapsis está ya remodelando la concepción del sistema inmunitario, un refinado entramado de intercambio de información más

parecido al sistema nervioso de lo que se pensaba.

La aplicación de la terminología sináptica a las interacciones entre células inmunitarias ha animado también a inmunólogos y expertos en neurociencias a comparar datos. Están descubriendo un número notable de proteínas comunes a los dos tipos de sinapsis. Sea por caso, la agrina; esta proteína, que interviene en la agrupación de otras proteínas en la sinapsis establecidas entre neuronas y células musculares, se acumula también en las sinapsis inmunitarias. La agrina intensifica, al menos, ciertos tipos de respuesta inmunitaria. De forma análoga, el receptor neuropilina-1, que participa en la señalización entre neuronas, se ha hallado además en las sinapsis inmunitarias. Los experimentos sugieren que la neuropilina-1 ayuda a las células inmunitarias en su búsqueda de enfermedades mediante la constitución de sinapsis inmunitarias con otras células. Sin embargo, se desconoce todavía la función del receptor en la inmunidad.

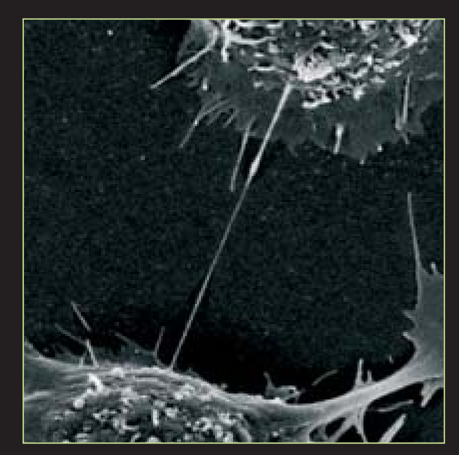
El equipo que dirige el autor identificó otra semejanza entre neuronas y células inmunitarias. Observaron que, con frecuencia, la membrana celular forma largos tubos entre las células inmunitarias y otros tipos celulares. La investigación que condujo a este descubrimiento comenzó a raíz de la publicación de un artículo sobre la observación de un fenómeno similar en neuronas. Seguimos sin conocer la función de tales autopistas nanotubulares, lo que constituye un nuevo reto para la inmunología y para las neurociencias.

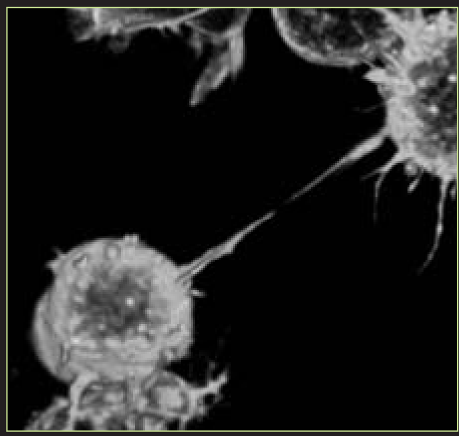
Los nanotubos de membrana podrían constituir, por ejemplo, un mecanismo de comunicación entre células inmunitarias desconocido hasta ahora, basado en la secreción dirigida de citoquinas entre células distantes. Simon C. Watkins y Russell D. Slater, de la facultad de medicina de la Universidad de Pittsburgh, han descubierto que una población de células inmunitarias utilizaría tales autopistas nanotubulares para la transmisión de señales mediadas por calcio a través de distancias enormes (en términos celulares), de cientos de micras, en segundos.

La investigación ulterior sobre la interacción entre grupos más numerosos de células inmunitarias habrá de esclarecer otros aspectos de las redes de comunicación inmunitaria. Otro desafío en la misma línea nos lo presenta la obtención de imágenes de interacciones *in fieri* entre células inmunitarias en el interior de organismos vivos, no sobre un soporte sólido.

En sus memorias, John Sulston, premio Nobel, describió el uso de un microscopio de última generación en los años setenta para investigar el desarrollo de un gusano: "Para mi sorpresa, observaba la división celular. Aquellas imágenes del gusano obtenidas por la técnica de Nomarski eran las más bellas que uno podía imaginar... En un fin de semana desentrañé la mayor parte del desarrollo postembrionario del cordón nervioso ventral, simplemente mirando".

La microscopía de alta resolución de las interacciones entre células inmunitarias es campo muy joven, que no dejará de depararnos nuevas sorpresas. Todas las proteínas de la superficie celular que intervienen en el reconocimiento de enfermedades por parte de las células del sistema inmunitario se han identificado y nombrado. Pero la observación de estas moléculas mientras desempeñan su cometido en el espacio y el tiempo reales ha desvelado el mecanismo de la sinapsis inmunitaria y ha vuelto a confirmar la validez del método científico fundado en la "mera observación".





6. LOS NANOTUBOS formados por la membrana celular conectan dos neuronas (*izquierda*) y dos células inmunitarias (*derecha*). Todavía se sabe muy poco sobre estas estructuras. Quizá constituyan un mecanismo de comunicación celular a larga distancia. Se ha observado que neuronas y células inmunitarias intercambian proteínas o calcio a través de estos nanotúneles. Se han podido contemplar, además, virus desplazándose de una célula a otra por el interior de los tubos.

CORTESIA DE HANS-HERMANN GERDES, REIMPRESO CON PERMISO DE "NANOTUBULAR HIGHWAYS FOR INTERCELLULAR ORGANELLE TRANSPORT", DE RUSTOM ET AL., EN *SCIENCE*, VOL. 303; ©2004 A.A.A.S. (*izquierda*); CORTESIA DE BJÖRN ÖNFELT Y DANIEL M. DAVIS (*derecha*)

El autor

Daniel M. Davis enseña inmunología molecular en el Colegio Imperial de Londres. Se ha especializado en el estudio, mediante microscopía de alta resolución, de las interacciones entre células inmunitarias. En 1999, durante su formación posdoctoral en la Universidad de Harvard, obtuvo las primeras imágenes de sinapsis inmunitarias en células asesinas naturales.

Bibliografía complementaria

THREE-DIMENSIONAL SEGREGATION OF SUPRAMOLECULAR ACTIVATION CLUSTERS IN T CELLS. C. R. Monks, B. A. Freiberg, H. Kupfer, N. Sciaky y A. Kupfer en *Nature*, vol. 395, págs. 82–86; 3 de septiembre de 1998.

NEURAL AND IMMUNOLOGICAL SYNAPTIC RELATIONS. Michael L. Dustin y David R. Colman en *Science*, vol. 298, págs. 785–789; 25 de octubre de 2002.

WHAT IS THE IMPORTANCE OF THE IMMUNOLOGICAL SYNAPSE? Daniel M. Davis y Michael L. Dustin en *Trends in Immunology*, vol. 25, n.º 6, págs. 323–327; junio de 2004.

THE LANGUAGE OF LIFE: HOW CELLS COMMUNICATE IN HEALTH AND DISEASE. Debra Niehoff. Joseph Henry Press, Washington, D.C., 2005.

Almacenamiento seguro del uranio altamente enriquecido

Numerosos reactores de investigación civiles contienen uranio altamente enriquecido con el que los terroristas podrían construir bombas nucleares

Alexander Glaser y Frank N. von Hippel

La bomba atómica que abrasó la ciudad japonesa de Hiroshima al final de la II Guerra Mundial contenía unos 60 kilogramos de uranio susceptible de experimentar una reacción en cadena. El ingenio norteamericano, "Little Boy", detonó sobre aquella ciudad portuaria cuando una parte de su carga —una masa subcrítica— fue lanzada contra la otra parte —una masa también subcrítica— mediante un sencillo mecanismo de escopeta; entre ambas sumaron una masa crítica de uranio 235, que estalló con la violencia de 15 kilotoneladas de TNT. El arma que pocos días después destruía Nagasaki empleaba, por carga explosiva, plutonio y no uranio. Su activación requería una técnica mucho más compleja.

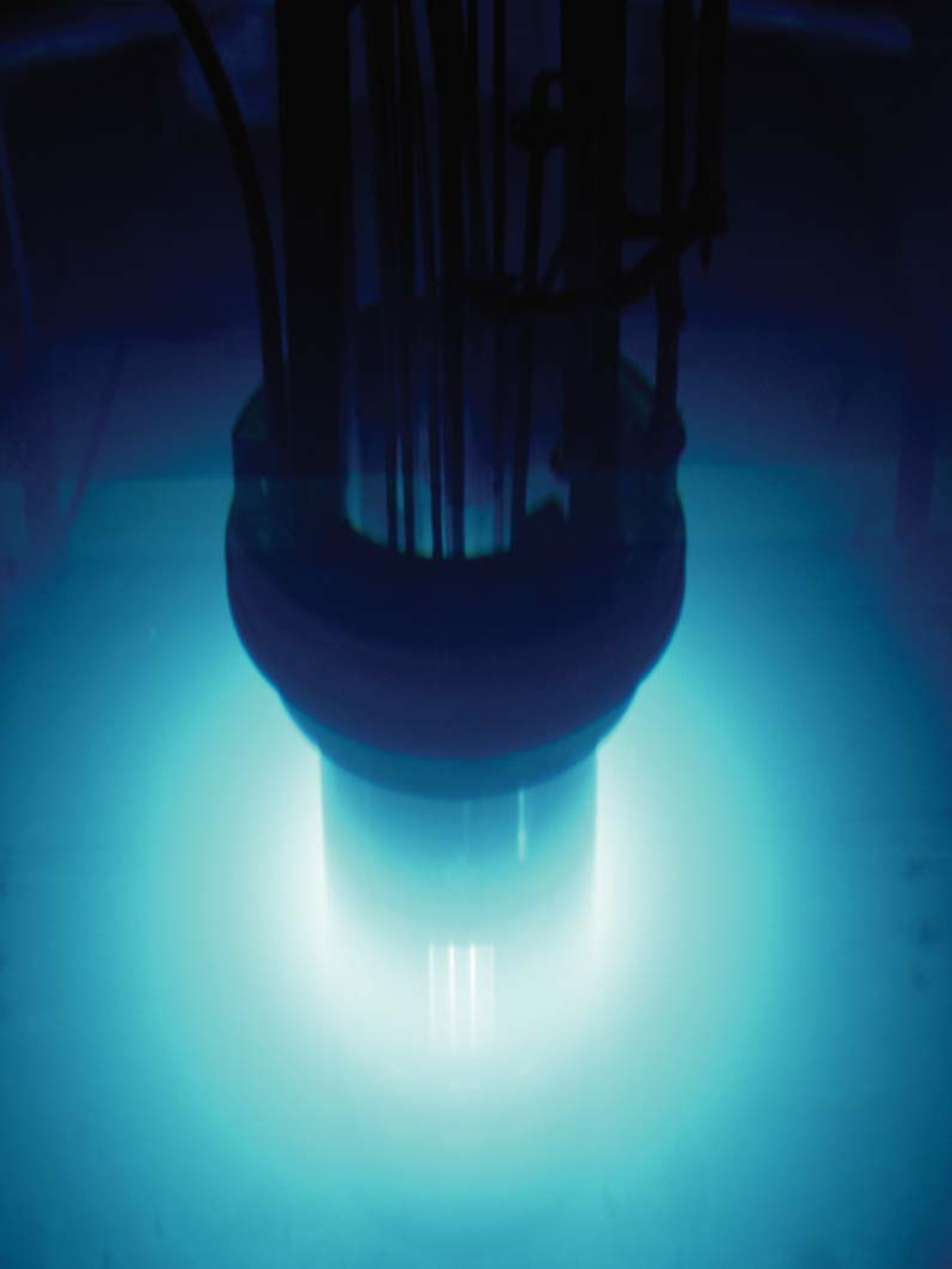
En los sesenta años transcurridos desde entonces, pese a que unos cuantos países fabricaron más de 100.000 armas nucleares y alguna situación límite se ha dado, no ha vuelto a repetirse tamaña destrucción. Hoy, sin embargo, ha surgido otra amenaza terrible: que una organización terrorista, como al-Qaeda, pueda hacerse con uranio altamente enriquecido (UAE), construya un tosco mecanismo de detonación por disparo y emplee el arma nuclear resultante contra una ciudad. El UAE es uranio cuyo contenido de isótopo 235, capaz de mantener una reacción en cadena, se ha concentrado hasta alcanzar un 20 por ciento, o más, en peso.

La técnica necesaria para construir una bomba atómica de tipo escopeta es tan elemental, que los físicos que diseñaron "Little Boy" no probaron el mecanismo de disparo antes de emplearlo; estaban seguros de que si la "escopeta" se disparaba, la bomba estallaría. Un grupo terrorista bien financiado podría, pues, construir un mecanismo de tipo escopeta que funcionase; no tienen dudas los expertos al respecto. Más aún: como algunos han señalado, resulta verosímil que unos suicidas penetraran en un depósito de UAE, construyesen un "ingenio nuclear improvisado" y lo detonasen antes de que reaccionara el personal de seguridad.

Aunque la producción de UAE sólo está al alcance de los estados, un grupo sí podría llegar a obtenerlo por robo o en el mercado negro. Hay unas 1800 toneladas de material creado durante la guerra fría, principalmente por EE.UU. y la Unión Soviética. Hoy puede hallarse UAE en lugares civiles y militares. Nos cen-

EL RESPLANDOR CERULEO DE LA RADIACION de Cerenkov en el baño de agua que refrigera un reactor nuclear de investigación revela que el sistema está aprovisionado de combustible y en funcionamiento. En muchos casos, las medidas de seguridad que los centros aplican para proteger el combustible de uranio altamente enriquecido son laxas, lo que facilita el robo del material.

ROGER RESSMEYER *Corbis*



traremos, no obstante, en el existente en las instalaciones civiles, donde se emplea como combustible en reactores nucleares de investigación. Nos preocupa especialmente el UAE civil porque está menos protegido que los polvorines militares. (El uranio combustible para generar electricidad en las centrales nucleares suele estar sólo levemente enriquecido, de un 3 a un 5 por ciento en peso.)

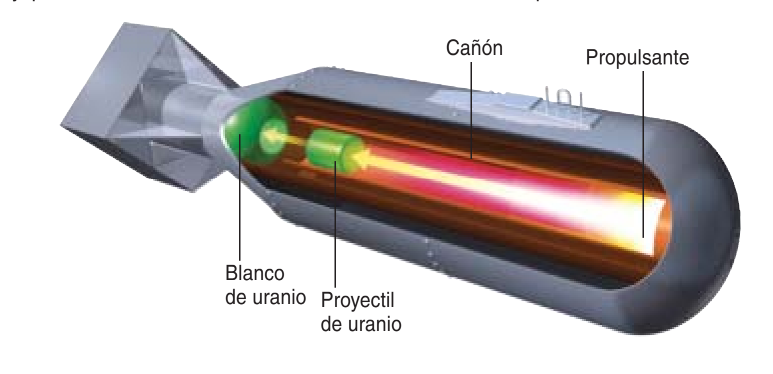
Hay más de 50 toneladas de UAE de uso civil dispersas por el planeta; alimentan unos 140 reactores para investigaciones científicas o industriales, o para producir los isótopos que se emplean en medicina. Esos lugares suelen hallarse en zonas urbanas; su protección por sistemas de alarma y vigilantes es mínima. Especialmente inquietante resulta la flota rusa de reactores alimentados por UAE, que constituye del orden de un tercio del total mundial y a la que está asociada más de la mitad de todo el UAE civil existente.

Es esencial mejorar la seguridad (*véase el recuadro* "Contra el robo de material nuclear"). Pero, a la larga, nada nos protegerá mejor de la amenaza que plantea el terrorismo nuclear que suprimir todo uso posible del UAE y eliminar las existencias acumuladas. El UAE recuperado se diluiría con uranio 238, el isótopo de uranio más corriente, incapaz de mantener una reacción en cadena, para producir uranio poco enriquecido (UPE, con menos del 20 por ciento de uranio 235), que no sirve para el armamento.

Que en el mundo haya UAE en tantos lugares se debe a la pugna armamentística entre EE.UU. y la Unión Soviética durante el período de "Atomos para la Paz" de los años cincuenta y sesenta. A la vez que las dos superpotencias de la guerra fría construían para sí centenares de reactores de investigación, proporcionaban esas instalaciones a terceros países, unos cincuenta, para ganarse su favor político y afianzar sus respectivas técnicas de reactores nucleares en el exterior. Posteriormente, correspondiendo a las demandas de un combustible nuclear más duradero, se relajaron las restricciones a las exportaciones. Ello comportó la instalación de más reactores de investigación alimentados con el UAE apto para el armamento, producido por ambas potencia en grandes cantidades para sus ojivas nucleares. Se trata de un material muy concentrado, con un 90 por ciento de uranio 235 aproximadamente. A finales de 2005, había en países que no poseen armas nucleares unas 10 toneladas de UAE idóneo para la fabricación de armamento; ese uranio, exportado por las potencias, es suficiente para construir de 150 a 200 ingenios explosivos nucleares con disparador de tipo escopeta.

CROQUIS PARA UNA BOMBA

Si unos terroristas consiguieran 60 kilogramos de uranio altamente enriquecido, podrían construir un explosivo nuclear similar al de la bomba atómica "Little Boy" que arrasó la ciudad japonesa de Hiroshima en las postrimerías de la II Guerra Mundial (*abajo*). Para ello, darían forma de "bala" a una masa subcrítica de uranio y la colocarían delante de una masa de propulsante, en uno de los extremos de un cilindro cerrado. El resto del uranio (también una masa subcrítica) se depositaría en el otro extremo del cañón de la "escopeta". Al detonarse el propulsante, la bala saldría proyectada, cañón adelante, contra la segunda masa de uranio. La combinación de ambas masas resultaría supercrítica y provocaría una reacción en cadena violenta: una explosión nuclear.



SLIM FILMS

Adaptación de reactores

En los años setenta, el gobierno estadounidense empezó a tomar medidas para impedir que el combustible para reactores de investigación que había exportado durante los veinte años anteriores se desviara a la producción de armas. En concreto, el Departamento de Energía lanzó en 1978 el programa de Enriquecimiento Reducido para Reactores de Investigación y Ensayos (ERRIE); a través del mismo, perseguía adaptar los reactores de diseño americano para que funcionasen con combustible de uranio poco enriquecido. A finales de 2005, se habían reconvertido 41 unidades. Esas instalaciones reconvertidas habían venido recibiendo al año, entre todas, unos 250 kilogramos de nuevo UAE apto para armas procedente de EE.UU.

Resumen/Salvaguarda del uranio 235

- Unos terroristas que se hicieran con menos de 100 kilogramos de uranio altamente enriquecido (UAE) podrían construir y detonar, con relativa facilidad, una bomba atómica muy eficaz, por rudimentaria que fuera. El UAE atrae también a los estados que se proponen desarrollar armas atómicas en secreto, sin necesidad de ensayarlas.
- Desgraciadamente, en el mundo hay grandes cantidades de UAE almacenadas en centros de investigación nuclear, especialmente en Rusia, muchas veces bajo mínimos de seguridad.
- EE.UU. y sus aliados han establecido programas para reforzar las medidas de seguridad, convertir los reactores para que usen uranio de bajo enriquecimiento (que no sirve para armas) y retirar el UAE de los reactores de investigación del mundo entero. Pero persisten lagunas peligrosas.
- La atención al máximo nivel de los gobiernos, junto con un moderado gasto adicional, podrían acercarnos a la solución definitiva del problema.

Se ha acometido ya o está prevista la sustitución del combustible de UAE de otros 42 reactores. Por desgracia, no será posible adaptar al combustible de uranio poco enriquecido unos 10 reactores de investigación de gran potencia hasta que puedan desarrollarse nuevos combustibles de UPE de las características necesarias. Esos reactores de gran potencia, que actualmente queman unos 400 kilogramos de UAE al año, suelen tener núcleos compactos para maximizar el flujo de neutrones en experimentos de dispersión neutrónica o en ensayos de materiales que requieren altas tasas de irradiación. Los actuales combustibles basados en uranio poco enriquecido no se comportan bien dentro de los núcleos de reactor compactos originalmente diseñados para UAE.

Para minimizar las repercusiones de la conversión en los reactores de gran potencia, los investigadores del programa ERRIE han de hacer combustible de uranio poco enriquecido de la misma geometría y duración que el UAE que debe remplazar. La tarea, empero, es todo un desafío técnico. Como, en el UPE, a cada átomo de uranio 235 lo acompañan cuatro de uranio 234, los diseñadores de los elementos de combustible deben aumentar en unas cinco veces la cantidad de uranio contenida en los elementos pensados para el uranio poco enriquecido, sin aumentar sus medidas. Tras años de trabajo, el pequeño programa para desarrollar combustible de UPE parece estar cerca de perfeccionar las técnicas de fabricación de una prometedora nueva generación de combustibles de alta densidad.

La recuperación del combustible apto para armas

En los años noventa, EE.UU. empezó a cooperar con Rusia en la protección y eliminación de las existencias de UAE. Movieron a ambas naciones los robos de combustible de UAE nuevo, aún no utilizado, en Rusia y otros países de la antigua Unión Soviética. De los robos sólo se informaba después de que el material se recuperase. Fuera de Rusia, nadie sabe su cuantía; quizá tampoco dentro.

Para limitar en Rusia la cantidad de UAE civil que podría trasladarse sin autorización, EE.UU. estableció en 1999 el Programa de Consolidación y Conversión de Materiales, con el objeto de adquirir y diluir unas 17 toneladas de UAE ruso civil excedente. A finales de 2005 se habían diluido unas siete toneladas a niveles del 20 por ciento de uranio 235.

Otro esfuerzo se centra en el combustible de UAE "agotado". Aunque en el momento en que se extrae el combustible usado ya se ha consumido del orden de la mitad del uranio 235 en la reacción de fisión en cadena dentro de los núcleos de los reactores, el uranio restante sigue siendo uranio 235 en un ochenta por ciento, el mismo porcentaje que en la bomba de Hiroshima.

Durante algunos años después de ser extraído de un reactor, el combustible agotado se "autoprotege" de los robos: es tan radiactivo que mataría en cosa de horas a quien tratara de manejarlo. Los operarios nucleares manipulan esos materiales por control remoto y se protegen con fuertes blindajes. Pero la intensidad del peligro de irradiación aminora con el tiempo. Tras unos 25 años, una persona desprotegida que trabajase a un metro de un elemento

¿Qué necesitan los terroristas nucleares?

Para fabricar armas nucleares, los terroristas tendrían primero que abastecerse de uranio altamente enriquecido, robándolo o comprándolo. El uranio natural se compone principalmente del isótopo 238, incapaz de mantener una reacción nuclear en cadena mediante la absorción y emisión de neutrones, y de una muy baja concentración (aproximadamente 0,7 por ciento) de uranio 235, isótopo que sí reacciona en cadena. Ambos isótopos difieren en peso en un 1 por ciento, aproximadamente. Ese hecho se aprovecha para separarlos y concentrar, o enriquecer, el uranio 235. Pero esa operación no pueden efectuarla los terroristas, ya que todas las técnicas conocidas resultan muy difíciles, largas y costosas.

En una masa de UAE que valga justo el valor crítico, una media de uno de los dos o tres neutrones liberados por la fisión de un núcleo de uranio 235 provoca la fisión de otro núcleo. La mayoría de los otros neutrones se escapa por la superficie, y no hay explosión. Para que una bomba con disparador de tipo escopeta funcione, sus constructores necesitan dos masas críticas de uranio altamente enriquecido, de modo que cada fisión cause, por término medio, más de una fisión nueva, generando así una reacción explosiva en cadena de crecimiento exponencial, como la que liberó la energía de la bomba de Hiroshima en una millonésima de segundo.

Para una bomba de implosión como la de Nagasaki, basta con menos de una masa crítica. En ese caso, la masa de plutonio se hizo supercrítica comprimiéndola con cargas explosivas externas especialmente conformadas. La implosión redujo los espacios entre los que los neutrones podían escapar de la masa sin haber causado fisiones.

El uranio apto para armas contiene un 95 por ciento, o más, de uranio 235, pero los expertos han advertido a la Organización Internacional de Energía Atómica que todo el uranio altamente enriquecido —todo uranio con más del 20 por ciento de uranio 235— debe ser considerado "material de uso directo", o sea, apto para armas nucleares. Por debajo del 20 por ciento, la masa crítica se hace demasiado grande para que encaje en un espacio razonable. Por ejemplo, para producir una masa crítica con uranio enriquecido al 93 por ciento, rodeado de un reflector de neutrones de berilio de cinco centímetros de grueso, se requieren 22 kilogramos, mientras que se necesitan unos 400 kilogramos con uranio enriquecido al 20 por ciento.



CENTENARES DE MILES DE DISCOS de fácil manejo, como el que se muestra en esta foto, cada uno con una pequeña cantidad de uranio apto para armas, pueden encontrarse en una instalación nuclear rusa. Para una bomba atómica harían falta muchos discos, pero su pequeño tamaño facilita la sustracción.

DEPARTAMENTO DE ENERGIA

de combustible de reactor que pese unos cinco kilogramos tardaría unas cinco horas en recibir una dosis de irradiación letal para la mitad de los individuos expuestos. Según los expertos de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA), a esos niveles ya no puede considerarse que el combustible se autoprotege.

Cada vez más urgente

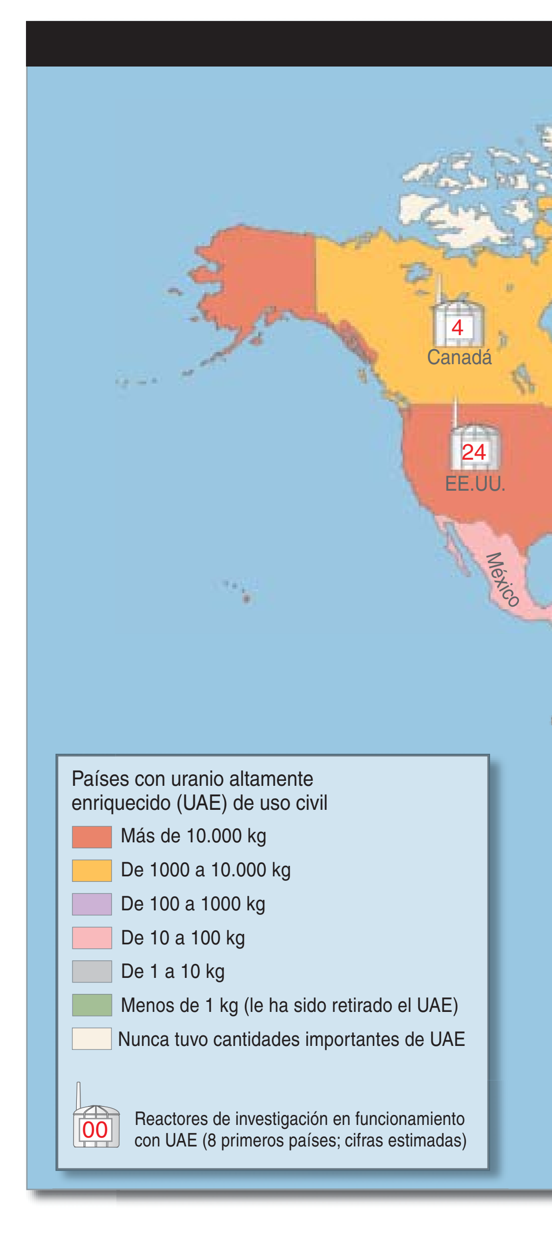
Para enfrentarse al peligro que representa un combustible agotado de UAE cada vez menos autoprotegido y disperso por el mundo, el gobierno de EE.UU. invitó en 1996 a los países que habían recibido combustible norteamericano de uranio altamente enriquecido a que devolvieran dos tipos comunes de combustible agotado. Seis años después, EE.UU. Rusia y la OIEA se unieron en el empeño de devolver a Rusia combustible tanto fresco como agotado. Pero hasta ahora no han progresado mucho. Ya se ha repatriado combustible agotado que originalmente contenía del orden de una tonelada de UAE estadounidense; quedan aún unas diez toneladas fuera de sus fronteras. A Rusia se ha devuelto alrededor de un décimo de tonelada de combustible fresco de UAE; parece que en otros países quedan almacenadas unas dos toneladas de UAE en combustible fresco y agotado de origen ruso. El combustible agotado de reactores de investigación devuelto a EE.UU. se está almacenando ahora en instalaciones del Departamento de Energía (DOE), habilitadas en Carolina del Sur e Idaho. Rusia extrae del combustible agotado el UAE y lo diluye para obtener combustible fresco de bajo enriquecimiento para centrales nucleares.

A raíz del 11 de septiembre de 2001, algunas organizaciones no gubernamentales y miembros del Congreso estadounidense han intensificado su presión sobre el Departamento de Energía para que se esfuerce más en salvaguardar las existencias de UAE civil en todo el mundo.

Theodore F. Taylor, ex diseñador de armas del Laboratorio Nacional de Los Alamos, había advertido ya en los años setenta del peligro de un terrorismo nuclear, pero la tragedia del 11-S hizo mucho más creíble su conminación. Creció la demanda de una limpieza mundial a fondo del UAE no militar. Como respuesta, el DOE estableció una Iniciativa para la Reducción Mundial de Amenazas que debía ampliar y acelerar algunos de los programas descritos antes. Ahora se pretende repatriar todo el combustible no irradiado y agotado de UAE de origen ruso para, respectivamente, 2006 y 2010, y para 2019 todo el combustible agotado de UAE de origen estadounidense. Prevé, además, el plan que en 2014 todos los reactores norteamericanos de investigación civil se hayan pasado al combustible de uranio poco enriquecido.

Se consiguió así dar vitalidad a algunos de los trabajos de eliminación de UAE, pero incluso un aumento en el presupuesto durante el año 2005 del 25 por ciento respecto al año anterior (hasta unos 70 millones de dólares), siguió dejando el programa en poca cosa comparado con los miles de millones de dólares asignados al despliegue de un sistema de defensa antimisil y a la defensa contra el terrorismo en territorio nacional. El bajo coste del crucial programa de eliminación del UAE explica en parte, por paradójico que parezca, que no haya tenido defensores de alto rango en ninguna de las administraciones presidenciales y sólo unos pocos partidarios comprometidos en el Congreso. El secretario de energía y los presidentes de los subcomités del Congreso claves en la asignación de fondos pasan la mayor parte de su tiempo discutiendo sobre programas de presupuesto muy elevado.

En Rusia, la situación es peor. Al gobierno parece preocuparle poco que unos terroristas puedan hacerse con material nuclear. Aún tiene que comprometerse a convertir sus reactores de investigación en reactores de uranio poco enriquecido. Por desgracia, el presidente George W. Bush dejó de presionar a Rusia en ese sentido. En una cumbre de febrero de 2005, él y el presidente ruso Vladimir Putin acordaron limitar a "terceros países" la cooperación de ambas naciones en la eliminación del UAE disperso. El gobierno de Putin se ha vuelto cada vez más reacio a los programas que autoricen visitas extranjeras a las instalaciones nucleares rusas, particularmente si esas iniciativas no reportan grandes sumas de dinero para su país.



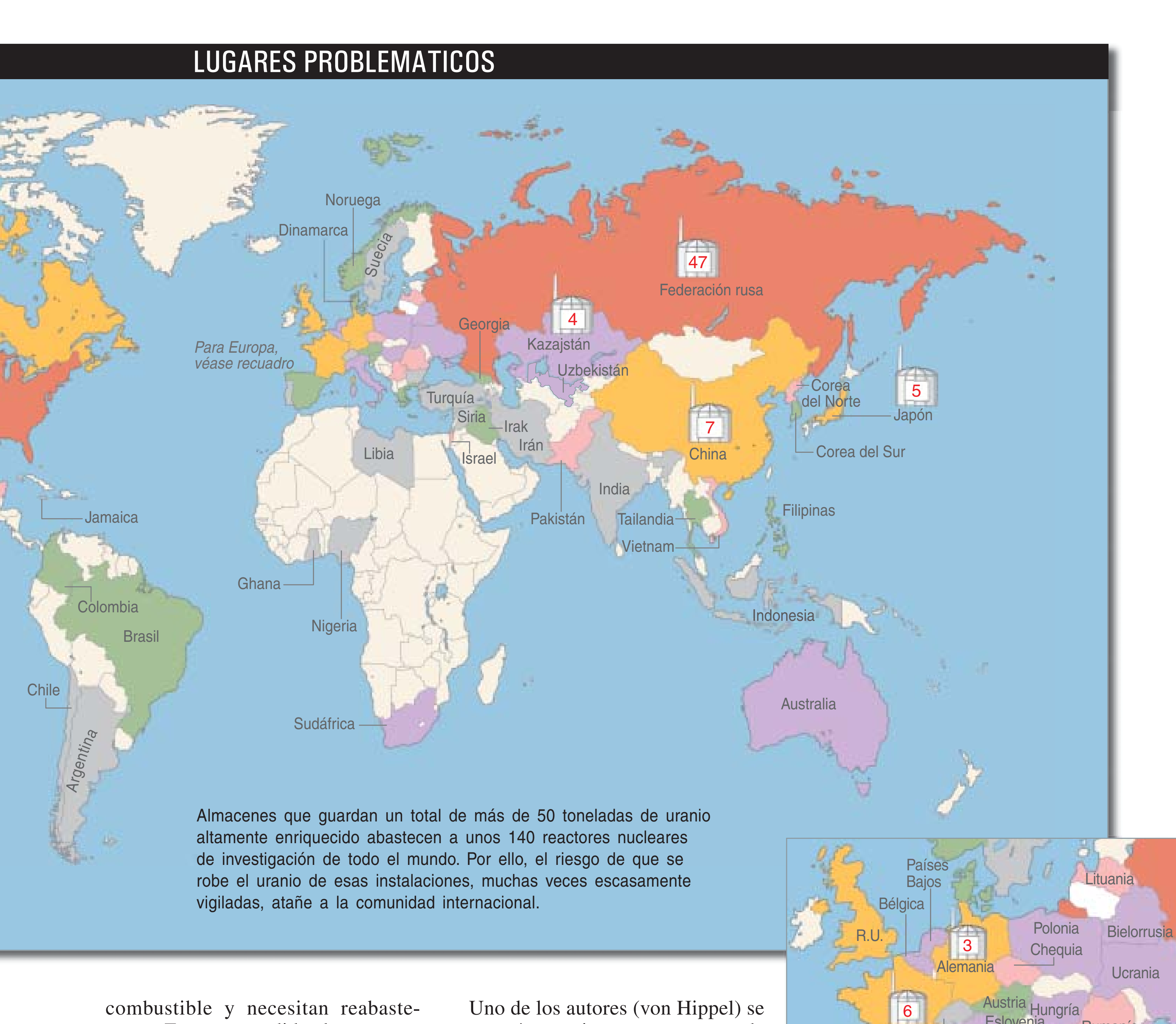
LUCY READING-IKKANDA

Los proyectos de eliminación del UAE aún activos en Rusia recurren por ello a un planteamiento "de abajo arriba". Sus representantes negocian directamente con los centros nucleares rusos, uno por uno, y les dejan a éstos que consigan la autorización de su gobierno. Afortunadamente, un millón de dólares, que al gobierno ruso le parecería insignificante, aún puede ser atractivo para un instituto nuclear con problemas financieros, por lo que varios de esos proyectos siguen su curso.

UAE olvidado

Los planes que se están ejecutando hoy de conversión y recuperación del UAE se concentran en los reactores de investigación que emplean ese

LUGARES PROBLEMATICOS



Almacenes que guardan un total de más de 50 toneladas de uranio altamente enriquecido abastecen a unos 140 reactores nucleares de investigación de todo el mundo. Por ello, el riesgo de que se robe el uranio de esas instalaciones, muchas veces escasamente vigiladas, atañe a la comunidad internacional.

combustible y necesitan reabastecerse. En gran medida, hacen caso omiso de los ensamblajes críticos y los reactores pulsantes, otros dos tipos de reactores de investigación en cuyo interior hay cantidades ingentes de ese material peligroso.

Un ensamblaje crítico es una maqueta a escala natural de un núcleo de reactor nuevo; sirve para comprobar si un modelo de núcleo realmente mantiene una reacción de fisión en cadena —si se torna "crítico"—, conforme a los planes de los ingenieros. Como se los suele limitar para que sólo generen unos 100 watt de calor, no requieren sistemas de refrigeración; para construirlos basta apilar combustible y otros materiales.

Uno de los autores (von Hippel) se encontró por primera vez con uno de esos ensamblajes en 1994, estando de visita, como representante de la Casa Blanca, en el Instituto Kurchatov, un centro de investigación nuclear de Moscú. Le acompañaban expertos en seguridad y en inventarios de materiales nucleares. Allí, en un edificio sin vigilancia, les mostraron 70 kilogramos de discos de uranio apto para armas casi puro, guardados en lo que parecía una taquilla de colegio. El uranio 235 estaba destinado a una maqueta "crítica" a escala natural de un reactor espacial. La visita dio lugar a la primera modernización de la seguridad de una instalación nuclear rusa costeada por EE.UU. Más recientemente, el Instituto Kurchatov y el DOE han iniciado conversaciones sobre un proyecto conjunto para volver "inofensivas" muchas de las instalaciones "críticas" que usan UAE en el Instituto.

Similar a ésas es una instalación "crítica" del Instituto Ruso de Física y Ergotecnia (IRFE), sita en Obninsk. En ella podría hallarse la mayor cantidad de UAE de todas las guardadas

Contra el robo de material nuclear

por Leslie G. Fishbone

Las naciones no sólo deben esforzarse en eliminar de los almacenes el uranio altamente enriquecido (UAE) para no dar facilidades a posibles grupos terroristas que quieran construir armas nucleares; deben, además, mejorar la seguridad de los reactores de investigación civiles que emplean ese combustible.

La necesidad de reforzar la seguridad se hizo patente en 1992, cuando un ingeniero de una instalación nuclear cercana a Moscú robó kilo y medio de UAE en minúsculas porciones, que fue llevándose a lo largo de varios meses. Esperaba comerciar con él. Lo detuvieron antes de que el uranio pasara a otras manos. Pudo haber sido peor. Según las estimaciones de la Oficina Internacional de Energía Atómica, para construir ciertos tipos de artefacto explosivo nuclear sólo se requieren unos 25 kilogramos de uranio.

Lejos de tratarse de una mera anomalía, ese hurto reflejaba un estado de inseguridad general. El hundimiento de la Unión Soviética en 1991 dejó su complejo nuclear expuesto a amenazas interiores y exteriores. Durante meses, ingenieros, científicos y vigilantes no recibieron sus sueldos. La estructura directiva se deterioró. La preocupación por robos potenciales de material nuclear se incrementó. Los gobernantes de Rusia, EE.UU. y otros países comprendieron el riesgo que suponían unos materiales desprotegidos. Establecieron programas de cooperación para mitigar esos riesgos. Entre ellos, el Programa de Control de la Protección e Inventariado del Material (MPC&A).

Formalizado en 1993, el programa establece la cooperación de los laboratorios nacionales del Departamento de Energía de EE.UU. con las organizaciones nucleares de la Federación Rusa. Los centros cuya seguridad se está mejorando comprenden laboratorios de investigación civiles, plantas de reciclado de combustible, instalaciones de investigación y producción de materiales nucleares militares y complejos de almacenamiento de armas nucleares. Los funcionarios norteamericanos asesoran y ayudan en su trabajo a los expertos rusos, pero éstos implantan las mejoras, que pueden incluir la construcción de instalaciones, la adquisición de equipos y la modificación de procedimientos. Con relación a dichos materiales, estadounidenses y rusos colaboran también en la mejora de reglamentos, normas, adiestramiento y prácticas contables.

En algunos casos, se realizan reparaciones parciales rápidas hasta que pueden acometerse cambios de mayor calado y generalidad. Por ejemplo, los centros sustituyen una puerta por un acceso reforzado equipado con una cerradura compleja. Luego, instalan un circuito cerrado de televisión para vigilancia y valoración de amenazas. Para controlar los materiales, se puede imponer de inmediato que, en cualquier tarea relacionada con dichos materiales, intervengan siempre dos personas. Después, puede introducirse un sistema automático de control de entradas que haga uso de tarjetas de identificación, contraseñas y verificaciones biométricas. Una mejora rápida del control de existencias consistiría en programar inventarios manuales de los contenedores de materiales nucleares, a intervalos regulares y confirmados mediante sellos que un manipulador del contenido debería violar. Más alcance tendría introducir puestos de medición computadorizada que comprueben, mediante los rayos gamma emergentes de los contenedores, los niveles de enriquecimiento de los materiales nucleares que guarden. Los resultados entrarían automáticamente en una base de datos informatizada que avisaría de las anomalías.

La docena de años de cooperación ruso-norteamericana en este programa ha rendido considerables avances. La puesta al día de la seguridad está ya concluida en 41 de los 51 emplazamientos de material nuclear identificados en Rusia y otros países de la ex Unión Soviética, incluidos complejos militares, instalaciones civiles y bases de abastecimiento naval. De las otras diez, continúan en ocho las operaciones de modernización. En cuanto a las dos restantes, el acuerdo no las abarca; se trata de instalaciones rusas de máximo interés estratégico. Mientras tanto, prosiguen trabajos acogidos al programa MPC&A en los depósitos de ojivas nucleares y misiles estratégicos de la ex Unión Soviética.

El mayor problema es la sostenibilidad a largo plazo. Se espera que vaya decayendo el apoyo norteamericano al programa. Los rusos tendrán que soportar solos la carga. Aunque el gobierno ruso lleva a cabo su propio trabajo en el programa MPC&A, los equipos y procedimientos no tardarían en degradarse en muchos lugares si cesara el programa de cooperación. Mantener el programa MPC&A es crucial para nuestra seguridad. Las consecuencias de un fallo grave en la protección del UAE podrían ser catastróficas.

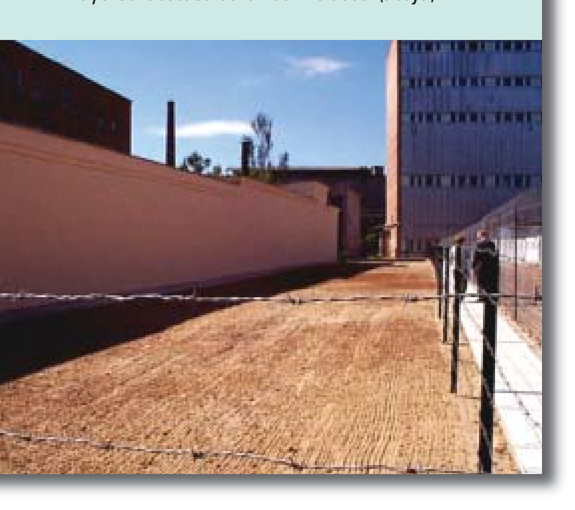
Leslie G. Fishbone trabaja en el Departamento de No Proliferación y Seguridad Nacional del Laboratorio Nacional de Brookhaven y ha prestado servicio durante más de diez años en el programa MPC&A.

en los emplazamientos de reactores de investigación del mundo: 8,7 toneladas, en su mayoría en decenas de millares de discos chapados en aluminio y acero inoxidable de unos cinco centímetros de diámetro (*véase el recuadro* "¿Qué necesitan los terroristas nucleares?"). Los operarios los disponen en columnas intercalando otros discos que contienen combustible empobrecido; así simulan distintos niveles de enriquecimiento medio. Como esos materiales emiten sólo radiación de bajo nivel, pueden apilarse a mano. Impedir que nadie se lleve un disco es una pesadilla. Recientemente, efectuamos un estudio que parece haber convencido al director del centro de que el laboratorio no necesita su uranio apto para armas. Miembros del DOE están interesados en establecer un proyecto conjunto para deshacerse de ese material.

Los otros consumidores de combustible de UAE pasados por alto, los reactores pulsantes, suelen funcionar a muy altos niveles de potencia durante períodos de milisegundos, o aún más cortos. Los laboratorios de armamento los emplean para evaluar las respuestas de materiales e instrumentos a descargas neutrónicas cortas e intensas, como las generadas en las explosiones nucleares. Esos sistemas plantean problemas de seguridad parecidos a los de los ensamblajes críticos, porque su combustible es también sólo levemente radiactivo. Un reactor pulsante, del Instituto Panruso de Investigaciones Científicas, el primer laboratorio ruso de diseño de armas nucleares, ubicado a unos 400 kilómetros al este de Moscú, alberga 0,8 toneladas de UAE. Tras una charla de uno de nosotros



EN NUMEROSOS EMPLAZAMIENTOS de reactores de investigación de la antigua Unión Soviética, las medidas de seguridad contra el robo de uranio altamente enriquecido son insuficientes. Oficiales norteamericanos y rusos están colaborando para reforzar tan cruciales protecciones. Los inspectores descubrieron que vallas, puertas y otros elementos de seguridad perimetral eran muchas veces insuficientes; estaban deterioradas incluso las de recintos muy delicados (*arriba*). Desde que se mejoró la seguridad de las instalaciones, los sistemas de barrera, como esta "zona despejada" en torno a un edificio, presentan mayores obstáculos a los intrusos (*abajo*).





(von Hippel) sobre los peligros del UAE, los investigadores del centro propusieron estudiar la viabilidad de convertir el reactor a uranio poco enriquecido.

Aunque en todo el mundo hay más de 70 ensamblajes críticos y reactores pulsantes alimentados con UAE —más de la mitad en Rusia—, hoy sólo hacen falta unos cuantos. Construidos la mayoría en los años sesenta y setenta, han quedado desfasados. Gran parte de sus tareas pueden simularse con ordenadores personales; calcularían el progreso de las reacciones neutrónicas en cadena ejecutando detallados modelos tridimensionales del reactor. Se suele confirmar la validez de esas simulaciones matemáticas contrastándolas con los resultados archivados de experimentos anteriores con sistemas "críticos". Puede, no obstante, que aún se requieran algunas instalaciones "críticas" alimentadas con UAE de uso inespecífico para llenar las lagunas de ensayos precedentes. Los pocos reactores pulsantes que aún se necesitaran podrían convertirse al uso de uranio poco enriquecido.

Más en general, un experto de la OIEA ha estimado que más del 85 por ciento del envejecido parque mundial de reactores de investigación podría desmantelarse. Señala que los servicios que prestan podrían cubrirse con un reducido número de fuentes neutrónicas regionales que empleasen las técnicas más modernas. Para que un programa de desmantelamiento les resulte atractivo a los investigadores que trabajan con reactores, vendría bien incluir también la mejora de los demás centros dotados de reactores de investigación. Europa y Japón podrían unirse a EE.UU. en esa empresa. El cierre de reactores constituiría incluso una fuente de financiación para los centros poseedores de reactores con grandes existencias de UAE levemente irradiado: esos almacenes les reportarían unos 20 millones de dólares por tonelada de UAE tras su dilución en el no peligroso UPE que se emplea en las plantas nucleares.

Hacia la solución

Los intentos de convertir los reactores de UAE llevan ya alargándose un cuarto de siglo. Que se siga empleando UAE tiene poco que ver con motivos técnicos. El fracaso se debe a la falta de apoyos oficiales de alto nivel. La resistencia de los usuarios de los reactores, que temen la renovación de las licencias o la mera clausura, también ha causado retrasos.

Pese a las actuales inquietudes acerca del terrorismo nuclear, la mayoría de los segmentos del programa de eliminación del UAE aún avanzan con lentitud exasperante. Los gobiernos tienen que aportar más fondos para que se acelere la conversión de aquellos reactores para los que se dispone de combustible de uranio poco enriquecido sustitutivo; deben, asimismo, garantizar que se desarrollen elementos de combustible de sustitución con los que convertir los reactores restantes. Además, el programa debe ampliarse para incluir todos los ensamblajes críticos, reactores pulsantes y los demás usos civiles, pocos, que usan UAE, como los rompehielos nucleares rusos.

Si EE.UU. y sus aliados se tomaran en serio el reto de prevenir el terrorismo nuclear, en cosa de cinco a ocho años desaparecería del mundo todo el UAE civil. El retraso en llevar esa tarea a su fin sólo sirve para que unos eventuales terroristas nucleares en ciernes cuenten con más tiempo a su favor.

Los autores

Alexander Glaser y **Frank von Hippel** participan en el Programa sobre Ciencia y Seguridad Globales de la Universidad de Princeton. Glaser acaba de doctorarse en física por la Universidad Técnica de Darmstadt, donde estudió los problemas técnicos de la conversión de los reactores de investigación. Von Hippel, físico teórico nuclear, es codirector del Programa. Entre 1993 y 1994 fue subdirector de seguridad nacional en la Oficina de Política Científica y Técnica de la Casa Blanca. Ambos forman parte de la recién establecida Comisión Internacional de Materiales Fisibles.

Bibliografía complementaria

CONTROLLING NUCLEAR WARHEADS AND MATERIALS. Matthew Bunn, Anthony Wier y John P. Holdren. Nuclear Threat Initiative and the Project on Managing the Atom, Harvard University, marzo 2003.

A COMPREHENSIVE APPROACH TO ELIMINATION OF HIGHLY-ENRICHED-URANIUM FROM ALL NUCLEAR-REACTOR FUEL CYCLES. Frank von Hippel en *Science and Global Security*, vol. 12, n.º 3, págs. 137-164; 2004.

THE FOUR FACES OF NUCLEAR TERRORISM. Charles D. Ferguson y William C. Potter. Routledge (Taylor y Francis), 2005.

Superconductividad de color

En condensados de quarks

La superconductividad y el magnetismo acostumbran presentarse como fenómenos antagónicos. En un superconductor electromagnético, los electrones de conducción forman pares en virtud de una fuerza que interactúa entre ellos; esa fuerza, débil y de atracción, se origina con la vibración de la red de átomos del material. Los pares de electrones involucrados se condensan, con lo que se hallan en el mismo estado cuántico.

Si se aplica al superconductor un campo magnético externo, puede acontecer, dependiendo de la magnitud del campo, uno de los dos siguientes fenómenos: que sea expulsado, y se produce entonces el efecto Meissner, o que se rompan los pares de electrones y, con ello, el estado superconductor.

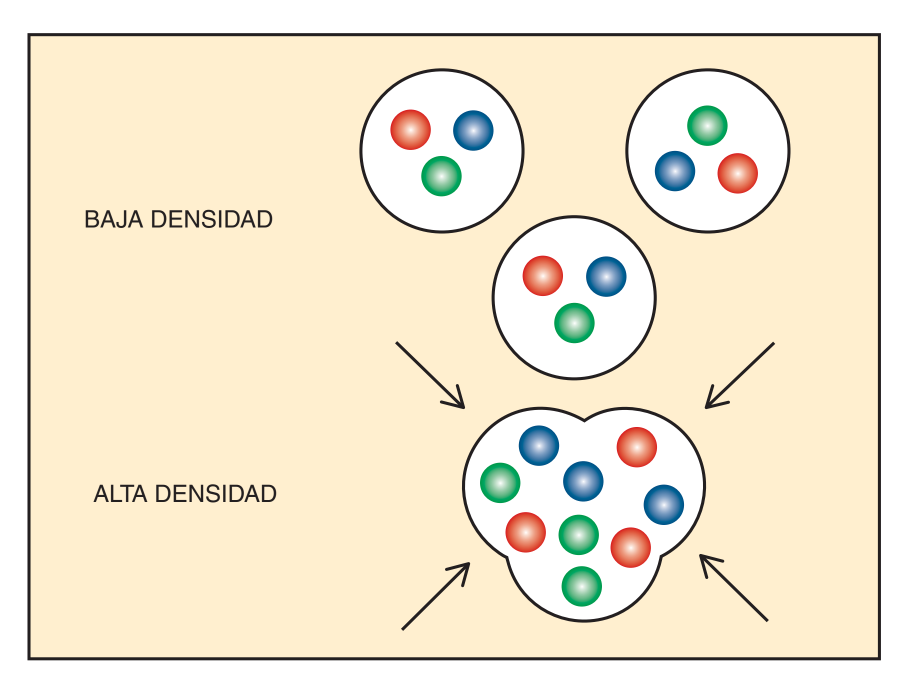
En colaboración con Efraín J. Ferrer y Vivian de la Incera, de la Universidad del Oeste de Illinois, hemos demostrado que la superconductividad de color podría desarrollar un fenómeno paradójico: adquirir mayor robustez en presencia de un campo magnético. Por superconductividad de color hemos de entender la condensación de pares de quarks que, se supone, tiene lugar en el núcleo de estrellas muy densas.

Los quarks son los constituyentes de los hadrones, partículas subatómicas que abarcan los protones y neutrones del núcleo atómico. La cromodinámica cuántica (QCD) es la teoría que describe las interacciones entre quarks, es decir, el intercambio entre ellos de gluones, que son las partículas mensajeras de la interacción nuclear fuerte. Esta interacción fuerte entre los quarks es tal, que siempre están confinados en hadrones y nunca se los observa separados y en libertad. Cuando se intenta separar dos quarks la fuerza que los une se hace cada vez mayor, hasta llegar a impedir su separación. Si por el contrario dos quarks se aproximan cada vez más, la fuerza que actúa entre ambos disminuye hasta resultar muy débil. A esta sorprendente propiedad de la QCD se la denomina libertad asintótica. Sus descubridores fueron galardonados con el premio Nobel de física del año 2004.

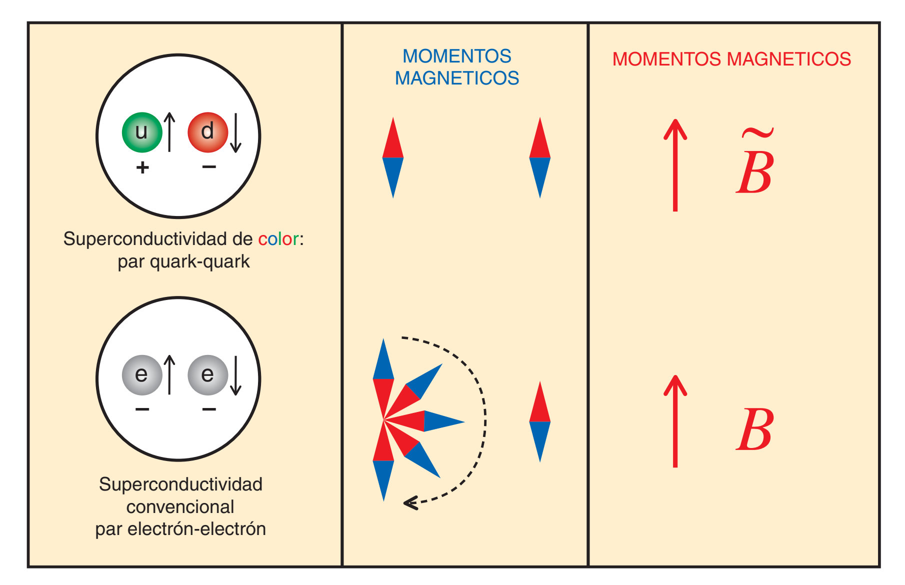
Entra dentro de lo razonable pensar en una densidad de neutrones y protones tal, que sus estructuras se mezclen unas con otras, se diluyan y confundan. En una situación semejante, los quarks permanecerían de forma natural muy cerca entre sí. La fuerza que experimentarían entre ellos se haría entonces muy débil, aunque seguiría siendo de atracción. Se darían entonces las condiciones necesarias para la formación de pares de quarks, y, por lo tanto, para la creación de un superconductor muy parecido al que se crea en ciertos metales a bajas temperaturas, que se caracteriza por la presencia de condensados de electrones.

Los quarks poseen un tipo de carga a la que se llama color. Aunque sin relación alguna con los colores del espectro, la analogía resulta muy útil para entender la yuxtaposición de cargas de color. Un quark puede ser rojo, azul o verde. Puesto que los pares quark-quark llevan una carga de color neta, al material correspondiente se le llama superconductor de color. A los superconductores formados por pares de electrones se los denomina superconductores electromagnéticos porque llevan carga electromagnética.

Los quarks poseen carga electromagnética, además de carga de color. Por ello cabe esperar que un superconductor de color sea también



1. En condiciones normales, las interacciones fuertes confinan los quarks en hadrones. Si se comprime un conjunto de hadrones hasta que las densidades sean muy elevadas, esas partículas acabarán por superponerse y sus estructuras se diluirán y mezclarán entre sí. A muy alta densidad, los quarks permanecen muy próximos entre sí. Debido al fenómeno de la libertad asintótica, sus interacciones se vuelven entonces débiles, aunque sin dejar de ejercer una acción de atracción. En estas condiciones de alta densidad fermiónica se forman pares de quarks, semejantes a los pares de electrones de los superconductores electromagnéticos a baja temperatura.



2. La figura muestra de forma intuitiva el efecto de un campo magnético externo en un superconductor de color y en otro electromagnético. En este último, el condensado de electrones consta de dos electrones, dotados de la misma carga eléctrica y momentos magnéticos antiparalelos. Un campo magnético externo obliga a los dos momentos a orientarse en la misma dirección, destruyendo el condensado. En el superconductor de color hay un electromagnetismo modificado, que proviene de la mezcla de fotones y gluones. En este caso el condensado de quarks se compone de partículas de carga opuesta, aunque con momentos magnéticos paralelos. Un campo magnético externo mantiene ese alineamiento, con lo que el condensado se refuerza.

un superconductor electromagnético. Pero a diferencia de lo que ocurre en los superconductores electromagnéticos ordinarios, el campo magnético intenso fortalece los condensados de quark-quark que constituyen el superconductor de color y modifica varias de sus propiedades.

Para ilustrar la idea física que se encierra en este nuevo resultado debemos tener en cuenta que las interacciones electromagnéticas se producen por medio del fotón y las interacciones fuertes entre los quarks por medio del gluon. En el superconductor de color, fotón y gluon se mezclan, dando por resultado una nueva interacción, un nuevo fenómeno: el electromagnetismo modificado. Los quarks poseen entonces una carga modificada, con respecto a la cual el condensado de quark-quark es neutro. En un superconductor de color sólo puede penetrar sin sufrir el efecto Meissner un campo magnético así "modificado".

Para entender bien la diferencia entre el efecto de un campo magnético en un superconductor electromagnético y en otro de color, observemos la figura 2. Electrones y quarks poseen momento magnético, propiedad que los hace comportarse como una brújula microscópica, que siempre tiende a orientarse en la dirección del campo. En el superconductor electromagnético los momentos magnéticos de los electrones apuntan en sentidos opuestos; un campo magnético intenso intentará alinearlos en un mismo sentido, lo que significa la destrucción del condensado. En el superconductor de color los momentos magnéticos de los dos quarks son paralelos; un campo magnético externo tiende a fortalecer su alineamiento, no a destruirlo.

Parece muy probable que las condiciones de densidad necesarias para que se dé la superconductividad de color existan en el núcleo de las estrellas de neutrones, cuya densidad llega a ser hasta diez veces superior que la del núcleo atómico. O tal vez se den en las hipotéticas estrellas de quarks, objetos estelares cuya densidad se hallaría entre la de las estrellas de neutrones y la de los agujeros negros.

Todas esas estrellas compactas generan campos magnéticos intensísimos. En concreto, los magnetares producen los mayores campos magnéticos conocidos en el universo, con magnitudes del orden de 10^{16} gauss. Hasta ahora se había supuesto que los magnetares eran estrellas de neutrones que contendrían electrones, neutrones y protones condensados en superconductores electromagnéticos. Pero si contuvieran materia de quarks en fase superconductora, su dinámica estelar sería muy diferente.

Desconocemos si en el interior de los magnetares se da superconductividad de color. Se está trabajando arduamente en la investigación de este fenómeno para refinar tanto la teoría como las observaciones y poder así detectar esa nueva forma de materia exótica.

CRISTINA MANUEL
Instituto de Ciencias del Espacio
(IEEC/CSIC)

Una cálida sensación

La proteína TRPV3

La regulación de la temperatura corporal resulta decisiva para nuestra supervivencia. La detección de variaciones térmicas reviste suma importancia, sobre todo cuando se trata de responder ante estímulos que podrían dañar nuestro organismo. De ahí la sensación de dolor experimentada ante temperaturas extremas, que nos mueve a reaccionar a tiempo y evitar un daño mayor. Retiramos la mano al contacto con una superficie ardiente o helada. Pero no todas las temperaturas resultan dolorosas. ¿Cómo detecta nuestro organismo las variaciones, en ocasiones sutiles, de temperatura?

A través del sistema somatosensorial percibimos los cambios de la temperatura ambiental, de la temperatura de los objetos que nos rodean y de los alimentos y bebidas que ingerimos. Refinado y complejo, el proceso de detección nos permite diferenciar variaciones térmicas dentro de un amplio rango de valores. Se

sabe desde hace tiempo que detectamos las temperaturas calientes, templadas y frías merced a la acción de los termorreceptores. Estos receptores sensoriales residen en las terminaciones nerviosas de las neuronas que inervan la piel y las mucosas. Cuando tocamos una superficie caliente, estrechamos la mano de un amigo o tomamos una bebida helada, se activan los termorreceptores: percibimos entonces la temperatura de los objetos con los que entramos en contacto.

Las bases moleculares del sistema somatosensorial no se revelaron hasta hace pocos años. La primera molécula termorreceptora en describirse fue el gen que codifica el receptor que detecta las temperaturas superiores a 42 ºC. Se clonó en el laboratorio del grupo de David Julius, de la Universidad de California en San Francisco. Al receptor se le impuso el nombre de "vaniloide", o "picante", porque respondía a la capsaicina, el componente picante de los pimientos; también se le conoce por TRPV1. Resultó ser un canal iónico de la familia trp (receptor de potencial transitorio) que responde a las temperaturas calientes.

El mismo grupo descubrió poco después un segundo miembro de la familia de canales trp: el TRPV2, que detecta las temperaturas superiores a 52 ºC. Tres años más tarde, el equipo de Julius y el de Ardem Patapoutian, del Instituto de Investigación Scripps en San Diego, describieron simultáneamente el receptor que detecta las temperaturas frías (de 15 a 25 ºC): el TRPM8, otro canal iónico de la familia trp, responde no sólo a las temperaturas frías, sino también al mentol (componente refrescante de la menta) y a otros compuestos químicos.

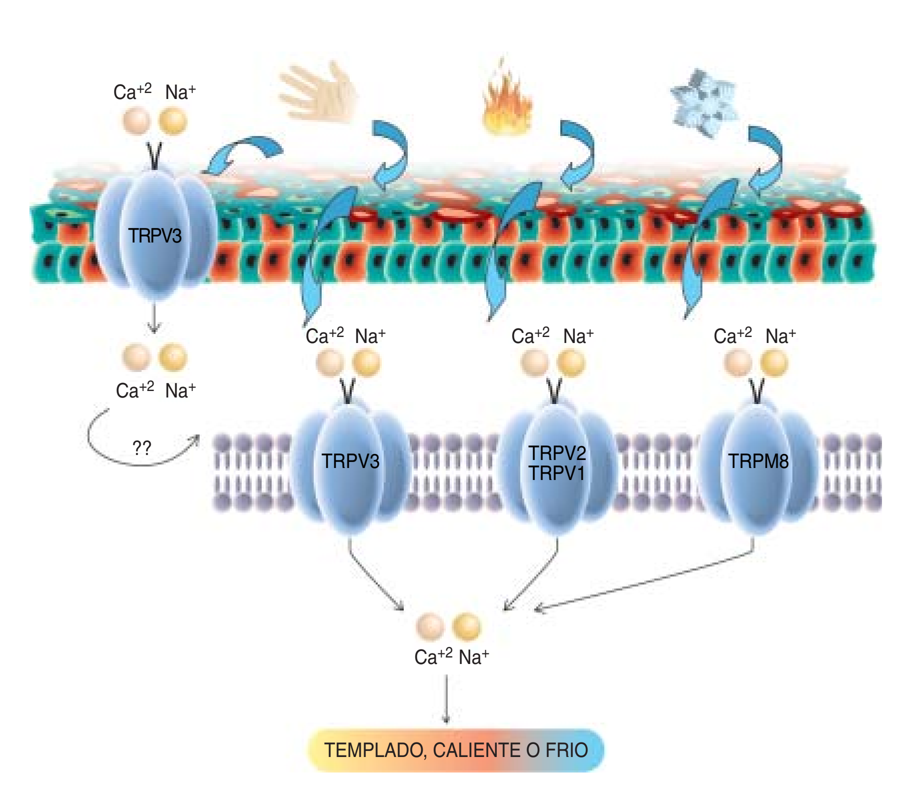
La supervivencia de un individuo depende, entre otros numerosos factores, de la regulación de la temperatura corporal y de la capacidad de detectar temperaturas potencialmente agresivas. Nuestro organismo debe mantener una temperatura constante, alrededor de los 37 ºC; para ello necesita responder a los cambios térmicos del medio externo. Pero, ¿cómo conseguimos detectar las temperaturas templadas en torno a los 37 ºC?

Tres grupos describieron de forma simultánea un nuevo miembro de la familia de canales trp, el TRPV3, que media la detección de las temperaturas templadas comprendidas entre los 32 y los 42 ºC. A diferencia de los anteriores, que se expresan casi exclusivamente en las neuronas termorreceptoras, este canal se expresa también en células de la piel y de la cavidad bucal. El TRPV3 responde asimismo a temperaturas que provocan molestia (entre 39 y 42 ºC), pero no a la capsaicina (como el TRPV1). Se aloja en las mismas neuronas que los receptores TRPV1 y TRPV2. En la piel, TRPV3 se expresa en los queratinocitos y en las células que rodean el folículo piloso; además de la inervación sensorial, reciben la del sistema nervioso simpático.

La importancia de este canal supera la de los precedentes. A tenor de los resultados obtenidos en nuestro laboratorio, TRPV3 es harto sensible a la temperatura, en general, y a la temperatura fisiológica en los mamíferos (37 ºC), en particular. Detecta temperaturas comprendidas entre las que activan el receptor del frío TRPM8 (entre 15 y 25 ºC) y las que activan el receptor del calor TRPV1 (superiores a 42 ºC). Reside en células de la piel (queratinocitos) y de las mucosas.

Se desconoce su función en estos tipos celulares. Con todo, se postula que TRPV3 responde en los tejidos periféricos a temperaturas templadas, inferiores a su umbral de activación (de 17 a 22 ºC). Además, TRPV3 responde también a pequeños cambios en torno a la temperatura media corporal (de 36 a 38 ºC). La cuestión estriba ahora en averiguar el mecanismo del que se valen células de la piel y mucosas para transmitir la señal de un cambio térmico a las neuronas sensoriales. Hasta la fecha no se han encontrado conexiones sinápticas entre dichas células y las terminaciones nerviosas de las neuronas que las inervan. De acuerdo con una de las hipótesis que se barajan, los queratinocitos detectan los cambios de temperatura y transmiten la información pertinente a las terminaciones nerviosas vía señales químicas.

El descubrimiento del TRPV3 abre un nuevo camino en la comprensión de cómo nuestro organismo detecta, de forma tan refinada, los cambios térmicos que se producen en el entorno. Sin embargo, quedan todavía muchas preguntas por responder:



Canales trp termosensibles. Participan en la detección de un amplio rango de temperaturas. Se expresan en las neuronas termorreceptoras. TRPV3 reside también en la piel, lo que sugiere una función distinta para este canal.

¿operan de forma independiente los canales termorreceptores o crean complejos heterogéneos dentro de la familia de canales trp? ¿Cambia la expresión de estos canales en diferentes procesos patológicos? ¿Qué moléculas endógenas activan estos receptores? Para desentrañar estas y otras cuestiones será de gran utilidad la obtención de modelos animales en los que se elimine la expresión de los receptores en cuestión.

INMACULADA SILOS SANTIAGO
Vertex Pharmaceuticals Incorporated,
San Diego, California

El pechiazul

Aspectos biológicos

El pechiazul (*Luscinia svecica*) es un ave paseriforme con amplia distribución en el Paleártico. Se han descrito hasta 11 subespecies, siete de ellas repartidas entre 22 países europeos. En el Viejo Continente habría unos dos millones y medio de parejas reproductoras. En el caso de la subespecie *L. s. svecica*, las poblaciones de mayor tamaño se encuentran en Noruega, Suecia, Finlandia y Rusia, con más de 1.600.000 parejas de aves estimadas. España ocupa el cuarto lugar en abundancia de la especie, con un máximo de entre 9000 y 12.000 individuos. La densidad de parejas reproductoras es elevada en Holanda (entre 3 y 4 por hectárea) y Austria (entre 4 y 5 por hectárea). En España encontramos la densidad poblacional más baja: de 0 a 5 parejas por 10 hectáreas.

La especie ha sufrido importantes oscilaciones en sus poblaciones en el transcurso del siglo XX. Tres de las subespecies europeas (*L. s. svecica*, *L. s. cyanecula* y *L. s. namnetum*) estarían incrementando su área de distribución en Noruega, Finlandia, Holanda, Alemania, Bélgica, Austria, Francia, Eslovaquia y República Checa desde los años setenta.

Existen diferencias morfológicas entre las secuencias de dos genes del ADN mitocondrial en dos de las subespecies (*namnetum* y *svecica*). Sin embargo, nuevos análisis genéticos (aunque realizados con una muestra reducida: un solo ejemplar del Guadarrama) sugieren un origen monofilético de todos los pechiazules euroasiáticos, que no justifica las diferencias subespecíficas existentes, pese a detectarse una manifiesta diferenciación geográfica en el plumaje, difícil de explicar mediante factores ecológicos.

Aunque los pechiazules españoles suelen incluirse en la subespecie *L. s. cyanecula*, podrían conformar una nueva subespecie, *L. s. azuricollis*. Esta propuesta se funda en características del plumaje: un gran número de individuos no presentan una medalla blanca en la garganta; de hecho, sólo el 47 por ciento de los machos del Sistema Central muestran este rasgo distintivo. Pero podría tratarse también de un factor ligado a la edad más que taxonómico.

En España, el Real Decreto 439/90 considera el pechiazul “de interés especial”. Se incluye en el Grupo I de la Directiva de Aves (91/244/ECC). El Convenio de Berna la define “estrictamente protegida”. En la península Ibérica, la especie cría con cierta abundancia, sobre todo en las montañas de la Cordillera Cantábrica (Asturias, León, Palencia y Zamora) y en las del Sistema Central (Segovia, Madrid, Avila, Salamanca y Cáceres), áreas separadas entre sí por unos 250 kilómetros. En una y otra zona las poblaciones están fragmentadas (metapoblaciones) debido a la distribución desigual del hábitat preferido por el ave para la reproducción: espesos matorrales de piornales (*Cytisus oromediterraneous*) o brezales (*Erica* spp.), con un mínimo de entre 50 y 100 centímetros de altura, entre parches de pastizales donde predominan las especies de *Agrostis* y *Nardus*.

El pechiazul nidifica cerca del agua, a una altitud de entre 1750 y 1950 metros. En el centro peninsular, las principales poblaciones reproductoras se encuentran en la Sierra de Guadarrama, Gredos y, sobre todo, en las Sierras de Béjar (Salamanca) y Piedrahíta (Avila). Se ha detectado reproducción esporádica en la portuguesa Serra da Estrela, la Sierra riojana de Cameros y los montes orensanos.

La cría se inicia entre abril y mayo, según la altitud. En ocasiones, sin



Ejemplar de pechiazul (*Luscinia svecica*).

embargo, algunos individuos ocupan zonas de cría a baja altitud (< 800 metros) a mediados del mes de marzo; se sitúan en áreas atípicas para la especie, con paisaje de encinar (*Quercus ilex*) y jaral (*Cistus* spp.) en proceso de regeneración y estiaje acusado. El número máximo de huevos por puesta en el Sistema Central es de cinco. La incubación ronda los 15 días; los pollos permanecen de 12 a 14 días en el nido. Se alimentan de insectos, sobre todo coleópteros, hormigas y dípteros, siendo estos últimos la presa favorita a la hora de cebar los pollos en mayo y principios de junio. Los juveniles permanecen en los aledaños del nido hasta mediados de agosto.

Poco se sabe sobre la migración del pechiazul ibérico. Individuos procedentes de otros países europeos y recapturados en España entrarían por el este y oeste de los Pirineos. Los machos adultos invernarían en la cuenca mediterránea española y el valle del Ebro, mientras las hembras y los jóvenes atravesarían el estrecho de Gibraltar camino de Africa, con pasos máximos en septiembre. En cuanto a la emigración, no se ha producido hasta la fecha ninguna recuperación de aves nacidas y anilladas en España; se desconoce, por tanto, dónde pasan el invierno nuestros pechiazules: ¿en la cercana cuenca portuguesa del Tajo-Guadiana o bien en Senegal y el golfo de Guinea? En marzo y abril, se observan individuos a lo largo de la costa atlántica del Sahara, pero se desconoce su origen.

Las poblaciones ibéricas son biométricamente semejantes a las de Europa Central (Holanda-Alemania), que dejan individuos invernantes en el sur y sureste peninsular. La longitud de la cola es mayor en las aves españolas. Los pechiazules machos del Sistema Central presentan mayor tamaño que las hembras: 75,6 ± 1,9 frente a 71,2 ± 2,3 milímetros en longitud del ala. En otras medidas corporales, en cambio, las diferencias son menores.

Salvador J. Peris
Dpto. Zoología,
Facultad de Biología,
Universidad de Salamanca

TOR:

Una proteína esencial en el crecimiento

Cuando una célula se prepara para dividirse, debe primero duplicar su masa y así garantizar que las células hijas posean el mismo tamaño que la célula original. La conservación del tamaño celular resulta esencial.

Cada organismo posee un tamaño característico, determinado por el tamaño de sus órganos, que, a su vez, está definido por el tamaño de las células que los constituyen. La correcta regulación del crecimiento celular asegura la proporción adecuada de los órganos y el tamaño apropiado del organismo.

¿Qué determina el tamaño celular? El crecimiento de las células responde a factores de crecimiento, nutrientes y otros estímulos externos; intervienen también estímulos físicos. Ahora bien, cuando las células alcanzan su tamaño definido, los estímulos en cuestión dejan de resultar condicionantes. Ello indica la existencia de un programa genético que gobierna el nacimiento celular y controla el tamaño de la célula, del órgano y, por fin, del organismo. Asimismo, regula la división celular, pues sólo las células que alcanzan el tamaño adecuado proceden a dividirse.

La "comunicación" correcta entre el crecimiento y la división celulares no sólo garantiza el tamaño correcto del organismo, sino que constituye además el mecanismo esencial de control de la división. La descoordinación de estos procesos da lugar a una división celular descontrolada (característica principal del cáncer). De ahí la importancia de identificar los mecanismos que regulan este "diálogo".

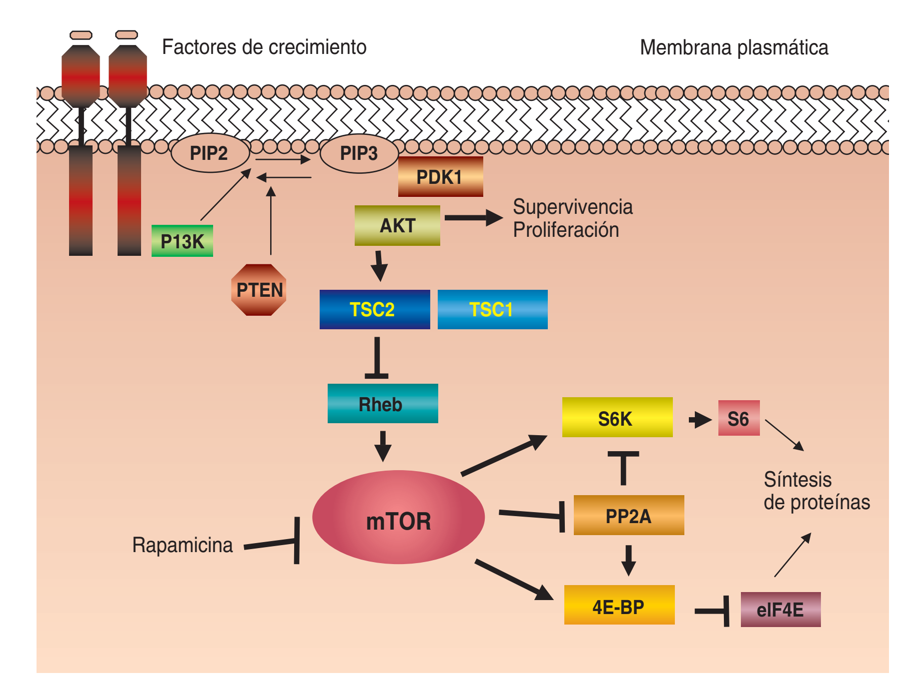
La proteína TOR ("target of rapamycin") se descubrió en la investigación sobre levaduras, cuando se buscaba la diana de la rapamicina, un macrólido con potente actividad antifúngica que se aisló de una muestra procedente de la isla de Rapa-Nui, de ahí su nombre.

La proteína TOR es una proteína quinasa altamente conservada que controla el crecimiento celular, de levaduras a mamíferos. Los trabajos con levaduras demostraron que TOR regula el crecimiento y la división celular mediante el control de la transcripción, la traducción y la biogénesis de los ribosomas que de forma colectiva determinan la masa celular. En fecha reciente, la investigación sobre *Drosophila melanogaster* ha demostrado que la señalización a través de la proteína TOR, al controlar el tamaño celular, determina también el tamaño del organismo entero. Estudios en neuronas y células musculares indican que TOR controla el crecimiento de células que no se encuentran en división, prueba adicional de la función conservada de TOR en la regulación del crecimiento.

¿Cómo opera TOR? En mamíferos, la variante mTOR (de "mammalian TOR") media las respuestas a nutrientes y factores de crecimiento; estímulos ambos que determinan el crecimiento celular. En respuesta a los factores de crecimiento, mTOR se modula a través de la vía de se-

ABREVIATURAS

MTOR: "mammalian target of rapamycine"
PI3K: Fosfatidil inositol3 quinasa
PI45P2: Fosfatidilinositol 4,5 bisfosfato
PI345P3: Fosfatidilinositol 3,4,5 trifosfato
PDK1: Quinasa dependiente de fosfoinositidos tipo 1
PH: dominio de homología con plecstrina
TSC1/TSC2: complejo esclerosis tuberosa 1 y 2
4EBP: proteína de unión al factor de iniciación tipo 4E
S6K: quinasa que fosforila a la proteína ribosomal S6



En mamíferos, mTOR integra las señales que controlan el crecimiento celular. Los factores de crecimiento se unen a sus receptores y activan la enzima PI3K, que fosforila el PI45P2 a PI345P3. La quinasa PDK1 se activa mediante la unión de este lípido a su dominio PH. PDK1 fosforila a la quinasa AKT, que, a su vez, transloca a la membrana mediante la interacción con PI345P3. AKT fosforila a varios sustratos, entre ellos el TSC2 (tuberina), que forma parte de un complejo con el TSC1 (hamartina). La fosforilación por AKT desestabiliza el complejo y suspende la inhibición que dichas proteínas ejercen sobre la GTPasa Rheb. La activación de Rheb se traduce en la activación de mTOR, que fosforila los sustratos 4EBP y p70S6K. Dichas fosforilaciones inducen la traducción, mediada por la proteína ribosómica S6 y el factor de iniciación eIF-4E. Con independencia de la fosforilación de TSC2, la enzima AKT fosforila otras proteínas que participan en el control de la proliferación y supervivencia celulares.

ñalización de la PI3K y su efector, la quinasa AKT/PKB. Esta enzima fosforila la proteína TSC2, o tuberina, que, con TSC1, o hamartina, forma un complejo. El complejo TSC1/TSC2 inhibe la activación de Rheb, una GTPasa de la familia de Ras. La fosforilación de TSC2 por AKT libera la restricción sobre Rheb que, a su vez, induce la activación de mTOR.

Ciertas mutaciones de los componentes de la vía anterior originan patologías relacionadas con la formación de tumores, lo que subraya su importancia en el control del crecimiento celular. Determinadas mutaciones en el complejo TSC1/TSC2 causan esclerosis tuberosa, un trastorno caracterizado por la formación de hamartomas (tumores benignos).

Las mutaciones que activan a los reguladores positivos de la vía (PI3K, AKT) y las que inactivan a los reguladores negativos (PTEN) aparecen en un elevado número de neoplasias malignas. ¿Por qué ciertas mutaciones en la vía de PI3K inducen tumores malignos y en TSC1/TSC2, no? La respuesta se halla en los efectores regulados por las distintas proteínas. Las mutaciones en el complejo hamartina/tuberina activan a mTOR; ello induce la síntesis proteica y activa el crecimiento de la célula, sin afectar a la proliferación ni a la supervivencia de la misma.

La vía de PI3K/AKT, en cambio, modula no sólo el crecimiento de la célula, sino también su supervivencia y proliferación. Cada uno de estos procesos, que vienen mediados por otros efectores de AKT, contribuye a la progresión del tumor resultante.

La función esencial en el control del crecimiento y la división celular hacen de la proteína TOR una diana de gran interés farmacológico. Hace algunos años se corroboró el efecto inmunosupresor de la rapamicina: al inhibir la síntesis de proteínas modulada por TOR, previene la activación y la proliferación de linfocitos T. La investigación más reciente señala que la rapamicina y sus análogos podrían constituir potentes drogas con acción antitumoral, sobre todo en tumores deficientes en PTEN.

El efecto de la rapamicina en la proliferación tumoral parece tener lugar mediante dos mecanismos: uno directo, basado en el bloqueo del crecimiento de las células tumorales, y otro indirecto, que evita el crecimiento de nuevos vasos sanguíneos (angiogénesis), proveedores de oxígeno y nutrientes a las células tumorales. En definitiva, el estudio de la proteína TOR y los mecanismos que controlan su actividad reviste suma importancia para el desarrollo de nuevos tratamientos médicos.

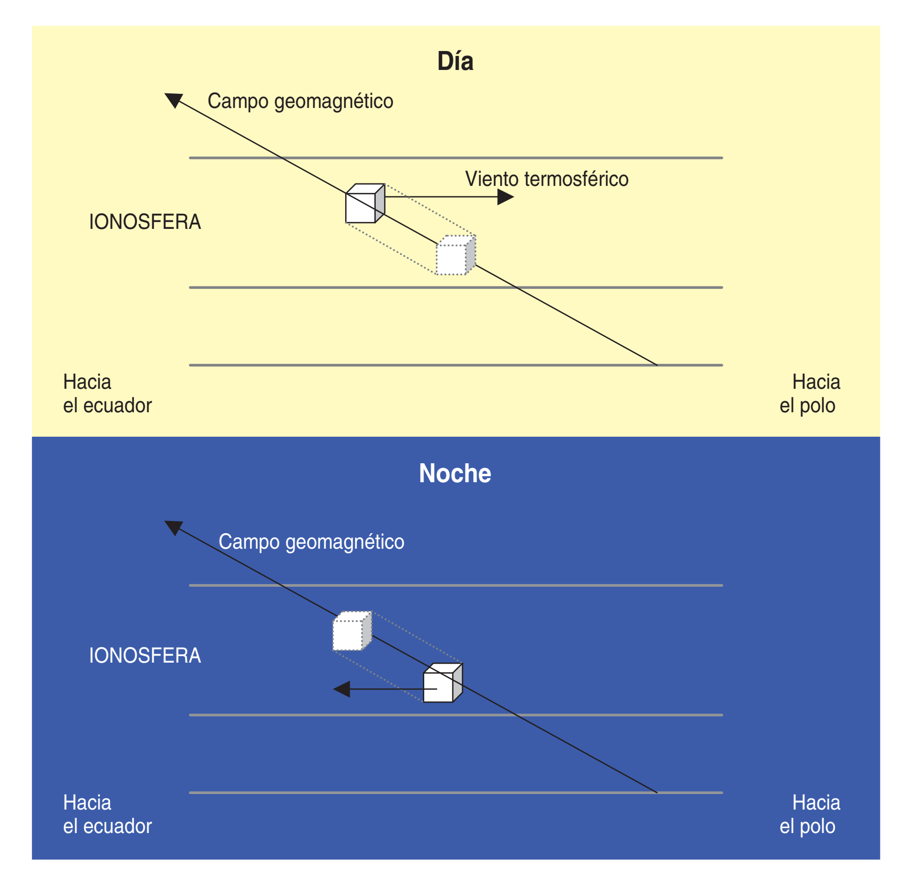
Isabel Mérida
Antonia Avila
Departamento de Inmunología y Oncología.
Centro Nacional de Biotecnología
CSIC, Madrid

Península Antártica

Sus vientos termosféricos meridionales

A latitudes medias, la atmósfera terrestre absorbe energía solar en las alturas donde los gases que la constituyen interaccionan mejor con la radiación. Así, en la parte superior de la estratosfera (región que se encuentra entre los 15 y los 35 km de altura, aproximadamente) y la parte inferior de la mesosfera (entre 35 y 80 km), la radiación ultravioleta del Sol calienta la atmósfera porque la pequeña cantidad de ozono que existe en esa región la absorbe.

A mayores alturas, la radiación ultravioleta extrema y los rayos X calientan la termosfera (por encima de los 80 km) al disociar y ionizar varios gases atmosféricos. El peque-



1. Esquema del movimiento de la ionosfera a alturas termosféricas como consecuencia del viento en latitudes medias del hemisferio sur. Los cubos representan volúmenes de ionosfera. Los de trazo continuo señalan dónde estaban; los de trazo discontinuo, su destino final.

ño porcentaje, del orden del 1 por ciento, de los gases que queda ionizado constituye la ionosfera.

En la termosfera coexisten gases en estado neutro (mayoritarios) y gases dotados de carga eléctrica. El gas ionizado más abundante a alturas termosféricas está formado por iones positivos de oxígeno atómico y electrones libres. La mayor densidad de ese gas iónico se encuentra entre los 200 y 500 km, que corresponden a la denominada capa F_2 de la ionosfera. La altura en concreto a la que sucede se simboliza con las letras hmF_2; el valor de la densidad en ese máximo, con las letras NmF_2.

Los vientos termosféricos a latitudes medias son consecuencia de este calentamiento. Se trata de vientos casi por completo horizontales. Divergen desde las latitudes donde el Sol se encuentra en las inmediaciones del cenit. En latitudes medias estos vientos soplan desde el ecuador hacia los polos durante el día y desde los polos hacia el ecuador por la noche.

Como no es fácil medir vientos a esas alturas desde el suelo, se prefiere determinar el movimiento de la ionosfera a alturas termosféricas y, a partir de ese movimiento, se estima la velocidad de los gases neutros que arrastran con fuerzas de fricción a iones y electrones.

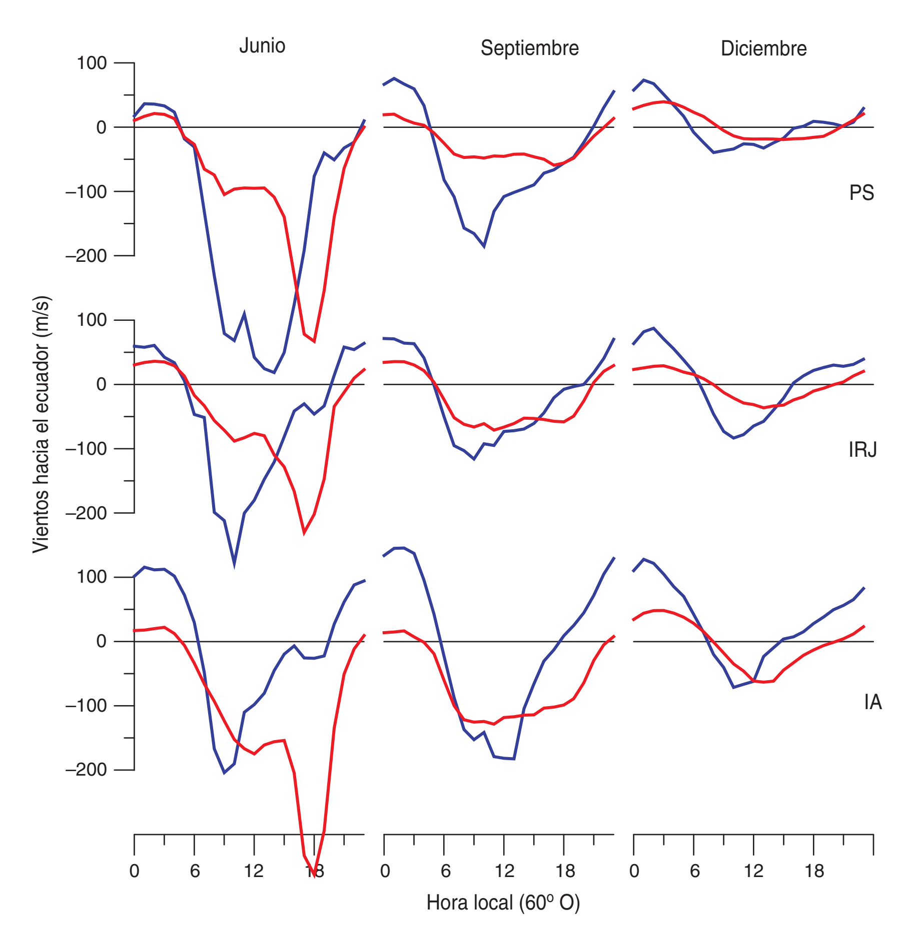
Los instrumentos que permiten determinar los movimientos de la ionosfera a alturas termosféricas en latitudes medias con buena aproximación, los radares de dispersión incoherente, están ubicados en el hemisferio norte. (Un radar de dispersión incoherente mide la anchura del intervalo de frecuencias de los ecos que recibe, resultado de la dispersión de la señal emitida por la ionosfera; la anchura depende de la temperatura de los electrones en el plasma atmosférico.)

Para complementar las determinaciones de vientos termosféricos en el hemisferio norte y recabar algunos datos en el sur, se han diseñado métodos que permiten estimar los movimientos ionosféricos con instrumentos mucho menos complejos: las ionosondas. (Los breves pulsos de alta frecuencia que emiten estos radares de dispersión coherente inciden verticalmente en la ionosfera; la intensidad de los ecos que se producen a distintas alturas en la ionosfera depende de la densidad iónica que tengan éstas.) En el hemisferio sur la cobertura de estos instrumentos resulta bastante limitada; hay muchos menos lugares de tierra firme donde instalarlos.

Cuando el viento termosférico horizontal sopla desde el ecuador hacia el polo arrastra consigo los componentes ionizados. Sin embargo, debido al campo magnético de la Tierra, el movimiento de los gases ionizados no es horizontal, sino que sigue la dirección de las líneas de dicho campo. Durante la noche, en cambio, los componentes ionizados ascienden y se mueven hacia el ecuador. Así, a partir de las mediciones del cambio de altura hmF_2 se puede estimar la componente meridional horizontal magnética (es decir, en la dirección del campo magnético) de la velocidad de los vientos termosféricos en ese mismo sitio.

El único intervalo de longitudes del hemisferio sur donde existe una cadena más o menos meridional de ionosondas entre los 45° y 65° de latitud es el que va del extremo meridional de Sudamérica a la península Antártica. De ahí el valor de estimar las velocidades de los vientos termosféricos en tal sector. Por otra parte, la geometría del campo magnético de la Tierra es también única en ese sector, por la existencia de la *anomalía magnética* del Atlántico Sur.

La componente meridional magnética horizontal de la velocidad de los vientos termosféricos se ha deducido de las observaciones de la altura hmF_2 por las ionosondas ubicadas en Port Stanley (PS: 57.1°S; 302°O), Isla Rey Jorge (IRJ: 62.2°S; 301°O) e Islas Argentinas (IA: 65.2°S; 296°O). Las observaciones corresponden a días magnéticamente quietos (sin variaciones irregulares de la intensidad y dirección del campo magnético de la Tierra), seleccionados de modo



2. Variaciones diarias de la componente horizontal de la velocidad de los vientos termosféricos (positiva hacia el ecuador). Corresponden a diez días de junio (invierno), septiembre (equinoccio) y diciembre (verano) de 1986 (baja actividad solar, *líneas azules*) y 1989 (alta actividad solar, *líneas rojas*). En esos días había tranquilidad geomagnética. Los valores se han tomado con ionosondas de Port Stanley (PS: 57.1°S; 302°O), Isla Rey Jorge (IRJ: 62.2°S; 301°O) e Islas Argentinas (IA: 65.2°S; 296°O).

que incluyan las condiciones características de las estaciones del año y de las épocas de actividad solar baja y alta.

Las formas de las variaciones diarias, cuando la actividad solar es baja, se parecen mucho en los tres lugares para cada estación del año, con la probable excepción de junio en Port Stanley (*véase la figura 2*). En todos los casos, la velocidad del viento pasa de un valor máximo orientado hacia el ecuador a un máximo hacia el polo en menos horas de lo que tarda el cambio correspondiente en el sentido inverso. Por lo tanto, la forma de la variación diaria no parece depender de la latitud, ni de la estación del año. En el caso de una alta actividad solar, tampoco parece existir una dependencia latitudinal. La variación diaria, que sí cambia drásticamente de invierno a verano, difiere de la observada en condiciones de baja actividad solar.

Por su parte, las amplitudes de las variaciones diarias son mayores en invierno que en verano en los tres lugares, tanto para la baja como para la alta actividad solar. Por último, cuando hay poca actividad solar los valores medios diarios de los vientos termosféricos apuntan en los tres lugares hacia el polo en invierno y hacia el ecuador en verano. Sin embargo, cuando la actividad solar es alta, apuntan hacia el polo en todas las estaciones del año, con mayor intensidad en invierno.

Alberto Foppiano Bachmann
Departamento de Geofísica,
Universidad de Concepción,
Chile

Ana Sabatés

El bongo

El desarrollo de métodos para la determinación de la abundancia de organismos marinos y su distribución en la columna de agua ha constituido uno de los grandes retos de la oceanografía. Lejos de presentar una distribución uniforme, los organismos tienden a concentrarse en zonas donde las condiciones ambientales y la disponibilidad de alimento les resultan favorables para la supervivencia.

El zooplancton medra suspendido o nadando en las masas de agua oceánica. Para la determinación de su abundancia relativa (número de organismos por unidad de volumen de agua), se utilizan redes de plancton, que retienen los organismos, a la vez que miden el volumen de agua filtrada. Según el tamaño de malla de la red, se recolectan organismos de tallas distintas: cuanto más fina la malla, menores serán los organismos retenidos. Por otra parte, mediante el aumento del diámetro de la boca de la red y la variación de la estrategia de pesca se puede incrementar el volumen de agua filtrada, lo que permite recolectar organismos de abundancia relativa inferior o más uniformemente distribuidos en la columna de agua.

Este es el caso de las redes de tipo bongo, denominadas así por su parecido con el instrumento musical de percusión. Ofrecen una ventaja: carecen de bridas delante de la boca, lo que facilita la captura de los organismos a la vez que les ahorra posibles daños. Por ello se utilizan, sobre todo, para la recolección de huevos y larvas de peces. Durante los últimos 30 años, numerosos estudios de las fases larvarias de peces han recurrido a esa técnica. Merced a esa estrategia, podemos comparar las informaciones procedentes de distintas áreas geográficas y, por tanto, estimar con notable precisión la abundancia de huevos y larvas de peces.



1. Red bongo en el momento del izado desde el buque oceanográfico. En el centro de la abertura de cada red se distinguen los medidores de flujo. El tamaño del poro de malla varía en función de la talla de los organismos que se pretenda capturar.



2. Huevos de peces de alrededor de 1 milímetro de diámetro. Viven flotando en aguas superficiales. A los pocos días eclosiona la primera larva, que en los primeros estadios se alimenta de las sustancias de reserva que contiene el huevo.



3. Larvas de peces de entre 10 y 12 milímetros de longitud y de unas pocas semanas de vida. Muestran ya cierta movilidad gracias a las aletas incipientes, que les permiten permanecer en zonas donde hay alimento suficiente para alcanzar el estado juvenil. La fase larvaria suele durar unas pocas semanas.

ELISABETTA BROGLIO (*red bongo*); CLAUDE CARRE (*huevos*)



Protecciones para Nueva



Orleans

Los huracanes Katrina y Rita devastaron la costa del golfo de México. Allí, la estación de las tormentas torna cada mes de junio ¿Se podrá alguna vez proteger debidamente las poblaciones costeras?

Mark Fischetti

En cuanto el huracán Katrina se abatió sobre Nueva Orleans en agosto de 2005, el presidente George W. Bush y el Departamento de Seguridad Interna de EE.UU. declararon que nadie podría haber predicho semejante devastación. Pero científicos, ingenieros y políticos del estado de Luisiana llevaban años advirtiendo de que una tormenta de categoría 4 o 5 que cruzase el golfo de México en una cierta dirección anegaría la región [*véase* "Deltas de zonas habitadas", de Mark Fischetti, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA de diciembre de 2001]. El agua que absorben los humedales del delta coadyuva a proteger la tierra firme de los grandes asaltos del mar. Para restaurarlos, el estado de Luisiana propuso en 1998 un plan de 14.000 millones de dólares. Pero el Congreso lo rechazó.

Más aún, algunos despachos de ingeniería privados y el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU., el principal organismo oficial en la protección contra las inundaciones, habían propuesto construir unos malecones de tierra más altos y poderosas compuertas. Habrían impedido quizá que las grandes subidas del nivel del mar en las tormentas entraran en los canales urbanos y reventasen los muros de hormigón que debían contener las inundaciones. Hay documentos que revelan que ya en 1968 se habían recomendado las esclusas; desde entonces, no ha habido decenio en que no se repitiera el consejo.

Nunca se costeó ninguno de esos planes. La causa de ello está, en gran medida, en las rencillas jurisdiccionales entre el Ejército, los políticos, municipales, comarcales o del estado de Luisiana, y el Congreso. Mientras, Holanda y el Reino Unido han levantado eficaces barreras protectoras contra el mar que EE.UU. ha ignorado. Tras el Katrina, la Universidad estatal de Luisiana, los despachos de ingenieros y el Ejército están desempolvando esos viejos proyectos, les van dando una dimensión aún mayor y quieren integrarlos en planes ambiciosos a fin de proteger Nueva Orleans y la Luisiana suroccidental. Medidas similares podrían salvar otras pobladas costas del golfo de México, de EE.UU. y del mundo entero.

Deltas en peligro

El del río Mississippi no es el único delta amenazado. Todos los deltas se hallan en peligro porque las actuaciones humanas hunden su suelo. El blando suelo de un delta se comprime naturalmente, pero las avenidas anuales del río depositan nuevos sedimentos sobre él. O los depositarían si los malecones construidos para evitar las inundaciones en muchas de esas regiones no eliminasen también el aluvión de sedimentos. A la vez, la extracción de petróleo, gas natural y agua dulce deprime la estructura de soporte del terreno. Y a medida que se hunde la superficie, entra agua salada del mar, que contamina las densas extensiones de manglares, árboles y hierbas de humedal. Sin esos tampones exuberantes, incluso una tormenta moderada puede llevar la crecida tierra adentro.

Además, el problema se complica porque el nivel de todos los mares está subiendo. Al ritmo presente, ascenderá de treinta centímetros a un metro en un plazo de 100 años. Las ciudades situadas a nivel del mar, de Nueva York a Shanghai, tendrían que protegerse con muros y bombas y añadir revestimientos estancos a los pies de los edificios hasta varias decenas de centímetros de altura, medidas que ya se están llevando a cabo en Venecia.

Un tercio de la población mundial vive en zonas costeras, en especial en deltas. Ricas en tierras de cultivo, pesca y recursos mineros, esas áreas son además puntos clave de entrada y salida de barcos. En El Cairo, en la embocadura del río Nilo, viven cerca de 16 millones de personas. Los deltas del río Rojo y del Mekong, en Vietnam, albergan cada uno 15 millones de habitantes, y ambos se están erosionando. Shanghai tiene 13,5 millones, el delta del Ganges en Bangladesh, 10 millones. Otros deltas amenazados son el del Orinoco, en Venezuela, y los del Rin, Ródano y Po en Europa.

El delta del Mississippi, donde viven 2,2 millones, representa la peor de las situaciones posibles. Se hunde y pierde humedales más deprisa que cualquier otro lugar del mundo; cada año se enfrenta a terribles huracanes. Las subidas del mar que incitó a británicos y holandeses a construir barreras protectoras fueron de cinco metros; el Katrina llegó a los 8,5 metros.

EN SU CRECIDA, las aguas irrumpen por una brecha en el muro de contención del canal de la calle 17 en Nueva Orleans.

Una parte esencial del problema son los malecones que el Cuerpo de Ingenieros del Ejército, con la aprobación del Congreso, fue construyéndoles a las riberas del Mississippi para prevenir las avenidas anuales, de modo que tras ellos pudieran establecerse explotaciones agrícolas e industrias. Pero esos diques han privado a la región de enormes cantidades de sedimentos, nutrientes y agua dulce. Las inundaciones naturales en la desembocadura del río enviaban también volúmenes de sedimentos hacia el oeste y el este, hasta una cadena de islas de barrera que cortan olas y crecidas. Reponían así cada año lo que arrastra la erosión marina. Pero como la desembocadura está ahora dragándose para que sirva de ruta marítima, los sedimentos siguen su camino hasta las profundidades del océano, dejando al delta —y a Nueva Orleans— inerme frente el mar.

Los ingenieros del Ejército y las industrias destrozaron los pantanos al dragar centenares de kilómetros de canales para facilitar el tendido de oleoductos. Se excavaron incluso canales de navegación más grandes y la erosión del oleaje de los barcos hizo, de aquellas hendiduras, tajos que allanaron el camino hacia la ciudad a las avenidas impulsadas por los huracanes. Obras similares se llevan a cabo en muchos de los deltas del globo, que podrían beneficiarse de un plan como el que ahora se está considerando en Luisiana.

¿Demasiado tarde?

El plan de 1998 para proteger la región del delta del Mississippi, de título Costa 2050, y un programa modificado en 2003, conocido como plan del Area Costera de Luisiana (ACL), reclamaban la instalación de compuertas en los malecones del río. Esas compuertas se abrirían en ciertas épocas del año para que vertiesen agua dulce y sedimentos en los humedales y los regeneraran. Pero, tal y como dice Len Bahr, durante quince años uno de los responsables de la Oficina del Gobernador de Luisiana para Actividades Costeras y uno de los arquitectos del Costa 2050, cada vez son más quienes reconocen que el Katrina y el Rita han cambiado el paisaje lo suficiente como para dejar envejecidos el Costa 2050 y el ACL.

Además, como las aguas de la tormenta penetraron en Nueva Orleans por el norte, procedentes del lago Pontchartrain, y por el este, desde los canales de navegación, resulta que esos planes no habrían detenido al Katrina, según Hassan Mashriqui, profesor del Centro de Huracanes de la Universidad estatal de Luisiana, quien ha mejorado los modelos de inundaciones que esa universidad había elaborado en 1998. Según dice, los modelos revelan que, para desviar la avenida, habrían hecho falta también unas compuertas en algunos de los canales que penetran en el centro de la ciudad.

Esas compuertas no le habrían valido de nada al resto de la Luisiana suroccidental. Por eso, nuestra revista ha solicitado a numerosos expertos que presentaran soluciones para la región. Sus respuestas se resumen en tres estrategias: un anillo hermético que sólo rodee el área metropolitana de Nueva Orleans; un sistema de 700 kilómetros de malecones que empezaría en la frontera de Mississippi y llegaría a medio camino de Texas, dejando fuera la costa, a la que se daría por perdida; y un escudo exterior en torno al perímetro de la región que, como el de Holanda, abarcaría todo el territorio, mientras que el anillo y los malecones dejarían a extramuros a alguna parte de la población. Los tres planes comprenden las compuertas de un tipo u otro que ya están en servicio.

Resumen/Control de inundaciones

- Los diques resultaron pequeños y débiles para contener la marejada del huracán Katrina. Se han propuesto sistemas de protección mucho más robustos para toda la Luisiana suroccidental.
- Las estructuras contra las inundaciones construidas en los Países Bajos, Inglaterra y otros lugares valdrían para proteger los deltas amenazados.
- Los ingenieros deben escuchar más el consejo científico a la hora de considerar la ubicación y la construcción de barreras.

Tres planes

Para contener las inundaciones provocadas por los huracanes de categoría 5, el gobierno y grupos privados o universitarios han propuesto tres tipos de planes de protección (*mapa superior*). El “anillo interior” (*rojo*) ampliaría y añadiría altura y anchura a los muros de los canales y diques ya existentes en Nueva Orleans, pensados sólo para tormentas de categoría 3; además, se conectarían con los dispersos malecones del río Mississippi.

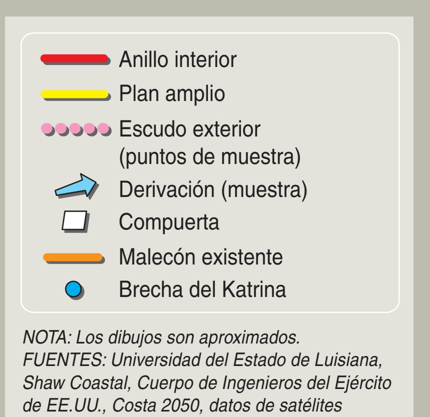
Un plan más amplio (*amarillo*) proseguiría la línea: por el este hasta la frontera con el estado de Mississippi; por el oeste, hasta más allá de Morgan City, para proteger más poblaciones e industrias. El malecón, de 700 kilómetros de largo y de 10 a 12 metros de alto, seguiría, en dirección oeste, el trazado de la Vía Navegable Intercostera, la principal ruta de navegación a través de los pantanos. El trazado que se muestra combina los contornos que han dibujado, por separado, el despacho de ingeniería Shaw Coastal, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU. y Hassan Mashriqui, del Centro de Huracanes de la Universidad estatal de Luisiana.

En cada caso, las derivaciones —compuertas en los malecones del río Mississippi— se abrirían en ciertas ocasiones del año para verter agua dulce, nutrientes y sedimentos en los pantanos y reanimar la vegetación y restaurar el terreno; así se contrarrestarían su hundimiento y la elevación del nivel del mar. El canal de avenidas Bonnet Carré trasvasará, cuando esté acabado, el agua de río desbordada.

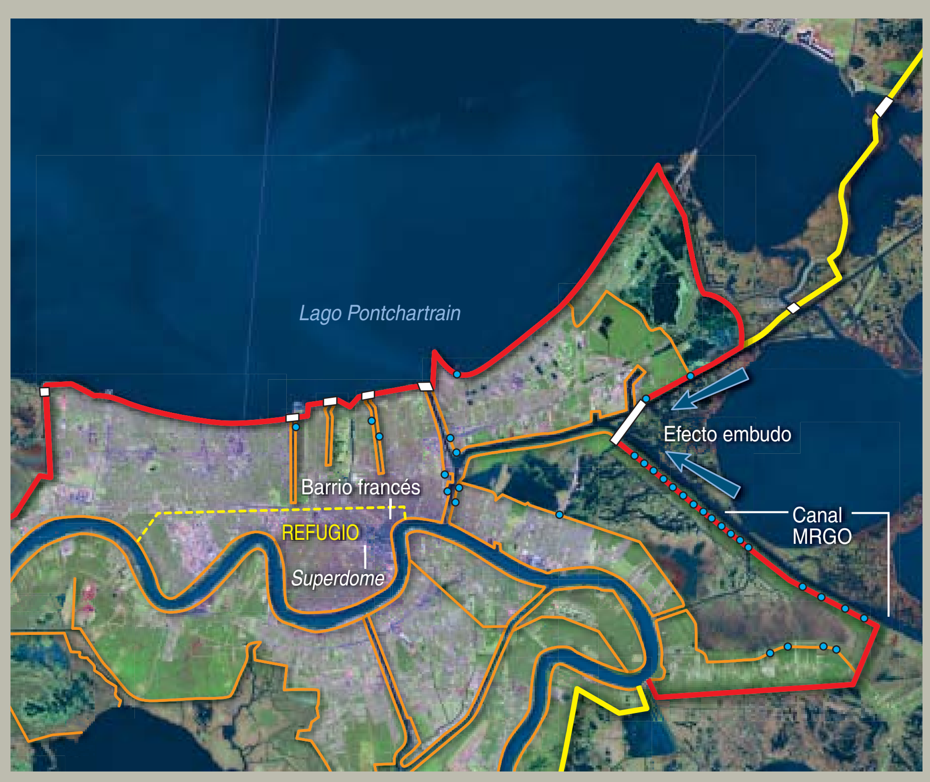
Otros expertos prefieren unir las islas de barrera con diques y largas cadenas de compuertas, formando un “escudo exterior” similar al de los Países Bajos. (No se ha trazado aún un recorrido completo, pero se ofrecen ejemplos en color rosa.) Se instalarían derivaciones para restaurar los humedales, importantes para la ecología y la economía. Cualquier plan de esta especie requeriría un nuevo punto de acceso para la navegación, antes de la desembocadura. Habría que dragar canales, pero se acortarían los tiempos de viaje y se acabaría con el dragado de la desembocadura del río; así, éste se rellenaría y enviaría a las islas de barrera y pantanos sedimentos que compensarían la arena que se llevan las olas.

Todos estos planes instalarían numerosas compuertas de distintos tipos. Se abrirían para la navegación y para conservar la mezcla natural del agua dulce y la salada, pero se cerrarían para cortar el paso de las marejadas al lago Pontchartrain o a los canales de navegación y avenamiento.

Baton Rouge
Río Mississippi
LUISIANA
MISSISSIPPI
Slidell
Río Pearl
Lago Pontchartrain
Canal de avenidas Bonnet Carré
Lago Borgne
Nueva Orleans
Morgan City
Houma
Vía navegable intercostera
Nuevo acceso (requiere un canal dragado)
Venecia
Isla Grande
Port Fourchon
LUISIANA
Golfo de México
Norte
0 10 20 millas
0 10 20 30 kilómetros
Acceso actual



NOTA: Los dibujos son aproximados.
FUENTES: Universidad del Estado de Luisiana, Shaw Coastal, Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU., Costa 2050, datos de satélites facilitados por el Servicio Geológico en el Centro Nacional EROS, Sioux Falls (Dakota del Sur)

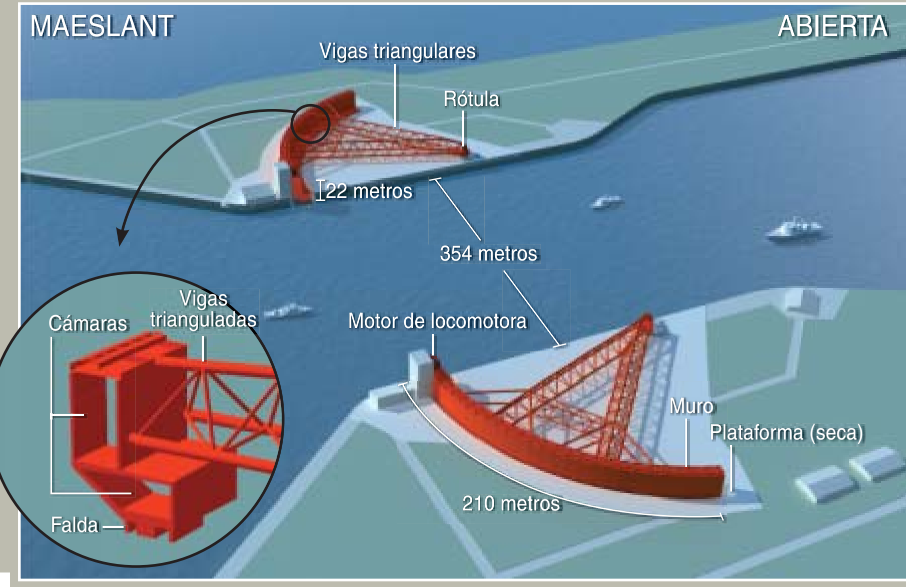


Según un plan de la Universidad estatal de Luisiana, se regularía el embudo de agua que causó la mayor de las brechas de los muros de contención durante el huracán Katrina y se cerraría el canal MRGO, un foco de erosión de los humedales. Algunos expertos proponen un "refugio", cercado por muros, sobre los que discurrirían calles elevadas, que impedirían su inundación.

JEN CHRISTIANSEN

Compuertas flotantes

En diversos lugares del mundo se protege la tierra firme del embate de las olas con compuertas. Podrían también ser beneficiosas para Nueva Orleans y otras poblaciones costeras. Los Países Bajos cuentan con la mayor variedad. La barrera de Maeslant (*derecha*) permite la navegación por el Canal Nuevo desde el mar del Norte hacia el puerto de Rotterdam, pero se cierra durante las tormentas. Son barreras huecas que se guardan en diques secos para limitar la corrosión y facilitar su mantenimiento. Para desplegarlas, se llena el dique de agua, la compuerta flota y un motor la gira. Seguidamente, las válvulas inundan de agua la compuerta y ésta se hunde. Pasada la tormenta, las bombas vacían las cámaras, las barreras vuelven a flotar, retroceden y las bombas secan de nuevo las plataformas donde reposan.





Aunque cada plan tiene sus partidarios, en algo están de acuerdo unos y otros: en la miopía de quienes afirman que es necio reconstruir en un lugar tan vulnerable. La costa del golfo no sólo tiene gran valor cultural, sino que, en palabras de Bahr, se trata del motor económico del país. Abandonarla, dice, quizá ni siquiera sería posible. El delta produce una quinta parte del petróleo de Estados Unidos, un cuarto de su gas natural y un tercio de su pescado. Billones de dólares en mercancías y cosechas fluyen por sus puertos. Tales actividades requieren infraestructuras extensas y decenas de miles de empleados, que no pueden vivir en remolques o en casas a dos horas de viaje.

Una nueva senda

Antes de poner en marcha un nuevo plan, sus redactores deben conocer perfectamente por qué fallaron los diques existentes, a fin de eliminar los puntos débiles en el futuro. Hay cuatro equipos investigando los derrumbes de los diques y paredes de canales de Nueva Orleans: los de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército, el estado de Luisiana y la Fundación Nacional para la Ciencia.

En octubre, el Secretario de Defensa Donald Rumsfeld anunció que la Academia Nacional de Ciencias examinaría todos los informes para determinar por qué se vinieron abajo los muros. Según Rumsfeld, la Academia habrá terminado su trabajo hacia junio de 2006. Pero la estación de los huracanes empieza oficialmente el 1 de junio, y Richard Wagonaar, coronel del Ejército de EE.UU. y jefe del distrito de Nueva Orleans del Cuerpo de Ingenieros desde julio de 2005, afirma que su propósito es devolver todos los malecones federales a su estado anterior al Katrina, capaz de resistir huracanes de categoría 3, antes de esa fecha. El presidente Bush había solicitado del Congreso la asignación de 1600 millones de dólares para reparar los daños causados en los malecones por el huracán Katrina y en diciembre pidió otros 1500 millones para mejorar hasta el nivel 3 los diques de la ciudad.

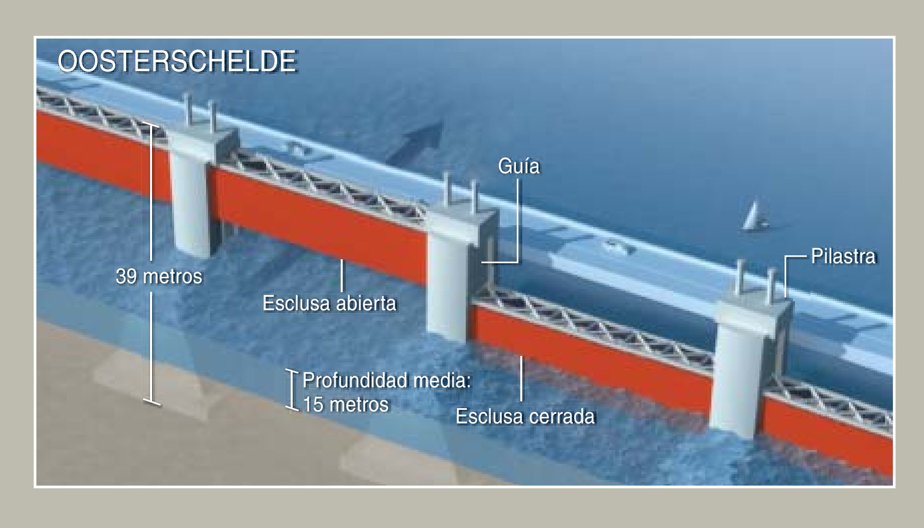
No obstante, Wagonaar y otros ven la restauración sólo como un primer paso. La protección de la ciudad debe subirse, creen, hasta la categoría 5. Para ello, el Congreso tendría que asignar mucho más dinero, vaya al Cuerpo de Ingenieros del Ejército o a algún contratista.

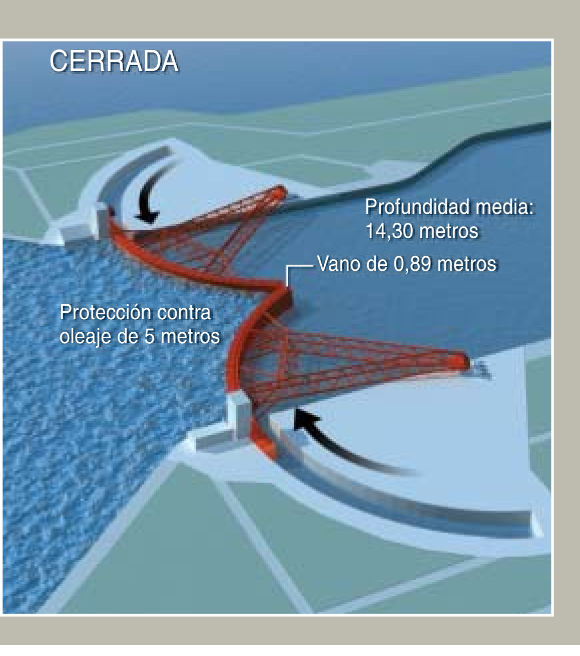
Con respecto a los planes que abarcarían con malecones una buena parte del territorio, hay más controversia. Pese a las diferencias locales, los

BRYAN CHRISTIE DESIGN (*diagramas*); JEN CHRISTIANSEN (*mapa*)

Compuertas deslizantes

Largos tramos de compuerta enlazan la tierra firme, las islas de barrera y los diques para formar una de las partes del escudo exterior de Holanda, la barrera de Oosterschelde (*derecha*). Esas compuertas podrían ser útiles en cualquiera de los planes de protección de Nueva Orleans. El complejo de Oosterschelde, de 3 kilómetros de largo, cruza tres canales. Cuando están izadas, las 62 compuertas de acero, entre pilares de hormigón, admiten las tres cuartas partes del movimiento mareal original que alimenta los estuarios tras las compuertas.







OOSTERSCHELDE: SKY PICTURES; MAESLANT: RIJKSWATERSTAAT, MINISTERIO DE TRANSPORTES, OBRAS PUBLICAS Y ADMINISTRACION DEL AGUA

planes esbozados por Shaw Coastal (integrada en el Grupo Shaw), Mashriqui y Wagonaar siguen un camino bastante parecido. Al sur y al oeste, unirían y alzarían los dispersos diques ya existentes, ahora al cuidado de distritos independientes, y protegerían la mayoría de las poblaciones importantes. Los planificadores están, empero, en desacuerdo acerca de quién debe hacer el trabajo, así como sobre el tiempo que durarían las obras y cuánto costarían. Estima Wagonaar que con el plan de los ingenieros militares —todavía, recuérdese, en fase de concepción—, las obras durarían de cinco a diez años y el coste sería de 25.000 a 35.000 millones de dólares.

El plazo le parece poco realista a O'Neil Malbrough, presidente de Shaw Coastal, despacho de ingeniería que ha construido diques y compuertas en muchos lugares del país, aunque a menor escala que la necesaria para el delta del Mississippi. Le indigna que los ingenieros militares empezasen a construir los malecones en torno a Nueva Orleans en 1965 y aún haya tramos incompletos. Una empresa privada hubiera actuado con mayor celeridad.



Afirma Wagonaar que no está al corriente de los planes de Malbrough o de Shaw; señala que no es probable que las empresas se comprometan, salvo que el Congreso de Estados Unidos convoque un concurso. El Cuerpo de Ingenieros del Ejército ha tenido durante un siglo un monopolio *de facto* sobre las obras costeadas con dinero federal contra las inundaciones.

En la zona de los huracanes confían en que quienquiera que se haga cargo de las obras no pase por alto lo que se va sabiendo acerca de cómo Katrina y Rita devastaron Nueva Orleans. A algunos les preocupa que el Cuerpo de Ingenieros no sea tan sensible como debiera a la información científica que le venga de fuera. Por ejemplo, Mashriqui ha determinado que la gran brecha del canal Industrial que inundó la parte occidental de la ciudad tras el Katrina se debió al "efecto embudo". Las simulaciones en ordenador y las pruebas físicas que Mashriqui obtuvo en octubre, como miembro del equipo de inspección del estado de Luisiana, muestran que el Katrina impulsó el agua desde el este hasta el MRGO, un canal de navegación de gran anchura, y a la vez a un canal contiguo, la Vía Navegable Intercostera. Los dos frentes de ola se encontraron donde ambos canales se estrechan para confluir en el canal Industrial. Según Mashriqui, esa geometría aumentó la altura del agua entre un 20 y un 40 por ciento; la presión del agua creció tanto, que reventaron las paredes del canal.

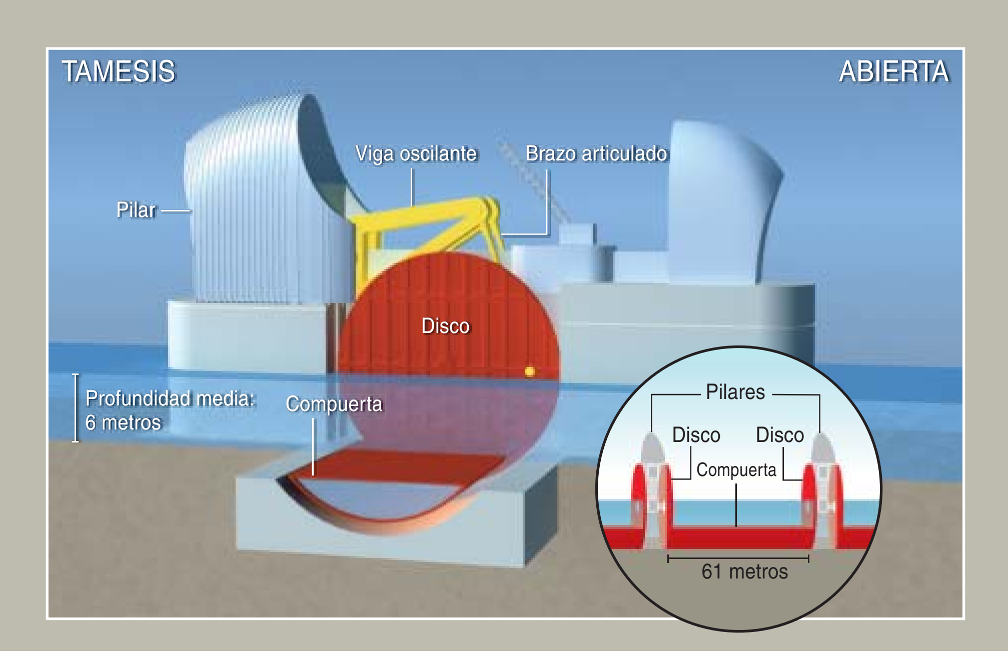
Los científicos habían predicho el efecto embudo. La Agencia Federal de Gestión de Emergencias realizó en 2004 una simulación de un huracán, al que llamaron Pam; el objetivo era mejorar la preparación ante un gran huracán real. El ejercicio preveía un efecto embudo, y en el mismo lugar.

Según Mashriqui, para proteger la ciudad hay que cerrar el MRGO e instalar compuertas en la Vía Navegable Intercostera. Muchos otros expertos han manifestado su acuerdo; señalan que el MRGO lleva muy poco tránsito de buques y su mantenimiento es muy costoso. Pero el canal MRGO fue construido por los ingenieros militares, observa Mashriqui; si también ellos hicieran suya esa conclusión, reconocerían, de hecho, que habían cometido un error.

No sólo a Mashriqui le preocupa el efecto embudo. Este mismo fenómeno fue una de las principales razones de que en 1982 se construyese la barrera del Támesis, que impide la amplificación de las crecidas de tormenta en el estuario del río. Cuando el canal se estrecha el cincuenta por ciento, el agua sube un cien por cien, según Martin Earlam, ingeniero jefe de la barrera. S. Jeffress Williams, del Servicio Geológico de EE.UU., que trabajó durante 20 años en Luisiana y ha estudiado deltas de todo el mundo, afirma que se han subestimado los efectos embudo.

Discos hidráulicos

La tormenta que en 1953 anegó los Países Bajos también produjo una crecida de cuatro metros y medio en el estuario del Támesis, donde mató a 300 personas. Hoy, 10 compuertas de acero están repartidas por el río, montadas en pilares y protegidas por relucientes cubiertas (*fotografía*). Las cuatro compuertas centrales miden cada una 60 metros de extremo a extremo y yacen acostadas en el lecho del río, llenas de agua, para no estorbar la navegación. En cada extremo de las compuertas hay un disco sobre un eje. Para izar una compuerta, se la gira con pistones y palancas hidráulicos mientras en su interior penetra aire que la desagua. Para devolverla al fondo, se la vuelve a llenar de agua.





Un escudo exterior

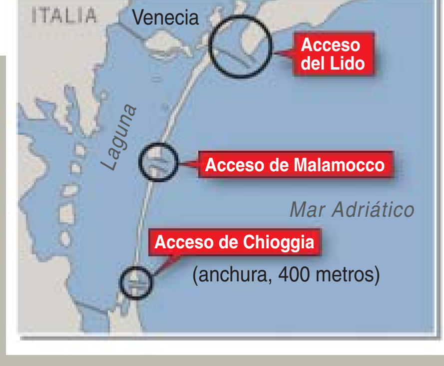
El plan de los malecones puede parecer más viable que el escudo total, pero hay razones que aconsejan encerrar las amplias extensiones de marismas que los otros planes dejarían desprotegidas ante el mar. Esos pantanos ofrecen albergue de invierno al 70 por ciento de las aves migratorias acuáticas de Estados Unidos, amortiguan olas marinas que, si no, afectarían a los oleoductos subterráneos poco profundos y absorben parcialmente niveles marinos crecidos. La región podría cercarse conectando con presas y largos tramos de compuertas las islas de barrera. Esta fue la opción adoptada por Holanda después de que, en 1953, una terrible tormenta generase una subida del nivel del mar de cinco metros que mató a 1800 personas e inundó más de 200.000 hectáreas. Casi todo ese país es un delta; un 26 por ciento de su superficie se halla por debajo del nivel del mar, tocando fondo a –6,7 metros; lo más hondo de Nueva Orleans no está tan bajo. También allí se está hundiendo el suelo, proceso acelerado por la extracción de agua dulce y turba, y también allí hay varios lagos y desembocaduras de ríos importantes. Hoy, Holanda está silueteada por más de 1600 kilómetros de diques, dunas, presas y compuertas, una línea mucho más larga que la necesaria en Luisiana.

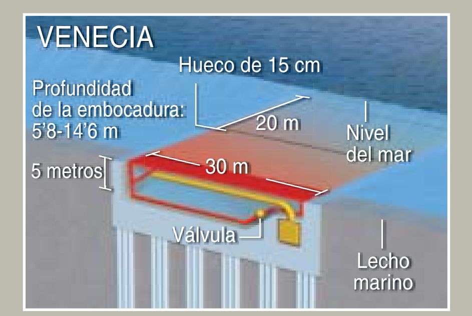
Según Joop Weijers, ingeniero del Ministerio Holandés de Transportes, Obras Públicas y Administración del Agua, la institución que se encarga del organismo Obras del Delta, un sistema similar podría servir para Luisiana y otros deltas del mundo. Aunque el escudo de Holanda pueda parecer grandioso, Weijers afirma que construirlo ahora costaría de 12.000 a 13.000 millones de euros. El mantenimiento se lleva unos 400 millones de euros al año. Pero, añade, una vez asegurada la costa, florecieron el turismo, la agricultura y la industria.

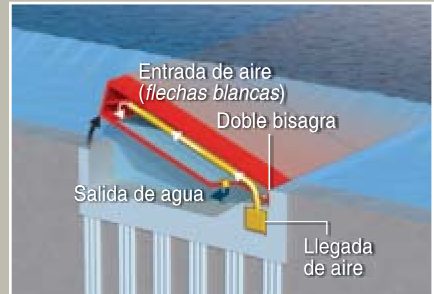
Según Len Bahr, el escudo exterior es una idea descabellada, aunque dado el alarmante deterioro del delta quizá hagan falta ideas descabelladas. Williams coincide en que, considerando el ritmo a que sube el nivel del mar, el hundimiento del terreno y la frecuencia y el rigor cada vez mayores de las tormentas, se trata de una opción admisible.

Portones levadizos

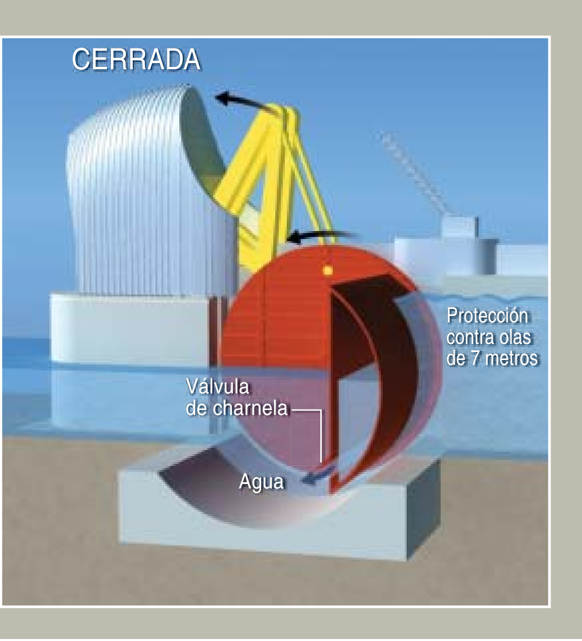
Muchas ciudades costeras de todo el mundo tendrán que prevenir las mareas y subidas del nivel del mar. Se están preparando los emplazamientos de las barreras que cerrarán los accesos a la laguna de Venecia cuando se acerquen mareas demasiado altas, como las que ahora se dan tres o cuatro veces al año (su mayor altura ha sido de 2 metros). En cada acceso se dispondrán 20 o 40 portones de acero huecos que descansarán en pesados lechos de hormigón. Para izarlos se expulsará el agua de su interior con aire comprimido; así flotarán y tomarán sus posiciones en menos de media hora (*diagramas*). Una esclusa contigua permitirá el paso de embarcaciones.













BRYAN CHRISTIE DESIGN (*diagramas*); JEN CHRISTIANSEN (*mapas*); TAMESIS: SKYSCAN

Asesoría científica

Aterrado por los estragos de 1953, el gobierno holandés se dispuso a levantar diques impenetrables en los anchos estuarios que dan al mar del Norte. Pero esas barreras interrumpieron los intercambios de agua dulce y salada y alteraron el entorno. En los últimos decenios, Obras del Delta ha cambiado de orientación; ahora prefiere barreras que se cierren sólo cuando una crecida del nivel del mar sea inminente. "Tardamos en comprender que, en vez de desafiar a la naturaleza, podíamos colaborar con ella", dice Weijers; aconseja a los planificadores norteamericanos que reflexionen a fondo y no dejen cabos sueltos.

Wagonaar, Malbrough y Mashriqui convienen en que deben incorporarse a cualquier plan que se adopte los aspectos de Costa 2050 y ACL encaminados a recuperar los pantanos. Las derivaciones —grandes portalones insertos en el malecón que sigue las márgenes del río Mississippi— abastecerían de agua dulce y sedimentos a los humedales. El plan del Cuerpo de Ingenieros del Ejército incluye un considerable número de compuertas que dejarían entrar y salir agua, según los objetivos del ACL.

Malbrough sostiene que, por muchos consejos que Holanda y Gran Bretaña tengan que ofrecer, "no necesitamos que los holandeses nos digan cómo construir una red de diques". Parece que el Cuerpo de Ingenieros opinaba también así antaño; sus responsables hicieron a esta revista unas declaraciones similares en 2001 cuando los encuestamos para nuestro artículo sobre los deltas habitados. En 2004, los responsables del Cuerpo de Ingenieros del Ejército y de las holandesas Obras del Delta firmaron un acuerdo para el intercambio de información; en octubre de 2005 varios ingenieros holandeses ayudaron al Cuerpo de Ingenieros a analizar el fallo de los muros de contención de inundaciones de Nueva Orleans.

La necesaria coordinación entre la protección física de los distritos que cuenten con diques y la restauración de la costa requiere un mando bien definido. Los expertos entrevistados para este artículo reconocen que las luchas intestinas de Luisiana ahogaron en el pasado propuestas de un monto menor. Espera Malbrough que el mensaje esté calando; a él, por ejemplo, le han contratado conjuntamente varios comités de mantenimiento de los malecones para que presente al gobierno del estado y al federal un plan coordinado. Tanto Malbrough como Mashriqui y Bahr piensan que de las obras debería encargarse un consorcio federal. Se oponen a que queden en manos del Cuerpo de Ingenieros del Ejército, al que tachan de demasiado lento, demasiado politizado por el Congreso y demasiado reacio a adoptar novedades técnicas.

Mashriqui insiste en que, se haga cargo el organismo que sea, se tenga sobre todo en cuenta el juicio científico. Pone el ejemplo del efecto embudo; previsto por los modelos, no se hizo nada por evitarlo.

Bahr reconoce que los ingenieros no han contado con los científicos en grado suficiente; también, piensa, habría que escuchar a antropólogos y sociólogos. Algunas "parroquias" (así se llama a las unidades administrativas comarcales de Luisiana) han quedado arrasadas por el Katrina: ¿dónde habría que reconstruirlas, desde un punto de vista social? Los datos de los científicos no valen de nada sin decisiones políticas, mantiene Williams.

Según Wagonaar, en el futuro el Cuerpo de Ingenieros del Ejército integrará mejor a los expertos no encuadrados en esa institución. "Ahora somos", dice, "más abiertos que hace cinco o seis años, sobre todo en las cuestiones ecológicas. Pero tampoco podemos estudiar la situación indefinidamente. Alguien tendrá que decidir algo".

Bibliografía complementaria

DELTAS DE ZONAS HABITADAS. Mark Fischetti en *Investigación y Ciencia*, n.º 303, págs. 66-72; diciembre 2001.

PRELIMINARY REPORT ON THE PERFORMANCE OF THE NUEVA ORLEANS LEVEE SYSTEMSS IN HURRICANE KATRINA ON AUGUST 29, 2005. R. B. Seed et al., Informe n.º UCB/CITRIS-05/01. Universidad de California, Berkeley, y Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, 17 de noviembre de 2005.

DRAWING LOUISIANA'S NEW MAP: ADDRESSING LAND LOSS IN COASTAL LUISIANA. National Research Council. National Academic Press.

Estrategias evolutivas de los cefalópodos

Asociadas a la reducción o pérdida de la concha, los cefalópodos actuales muestran una combinación de características que explican su éxito evolutivo

Angel Guerra

El ciclo biológico de un organismo nos remite a la secuencia de acontecimientos a través de los cuales su material reproductivo se desarrolla y madura hasta un estado que le permite dejar descendencia. Esa secuencia incluye el desarrollo embrionario, el crecimiento, la maduración gonadal y demás procesos asociados con la reproducción.

A propósito de ello cabe plantearse ciertas preguntas relacionadas con los cefalópodos: ¿Por qué todos sus representantes actuales, excepto *Nautilus*, han adoptado la estrategia de madurar sexualmente una sola vez en su vida y morir después? ¿Por qué tienen unas tasas de crecimiento elevadas y son tan poco longevos? ¿Qué beneficios les reporta poseer un desarrollo embrionario directo, es decir, carente de fases larvarias que se transformen en adultos por metamorfosis, como ocurre en la mayoría del resto de los moluscos?

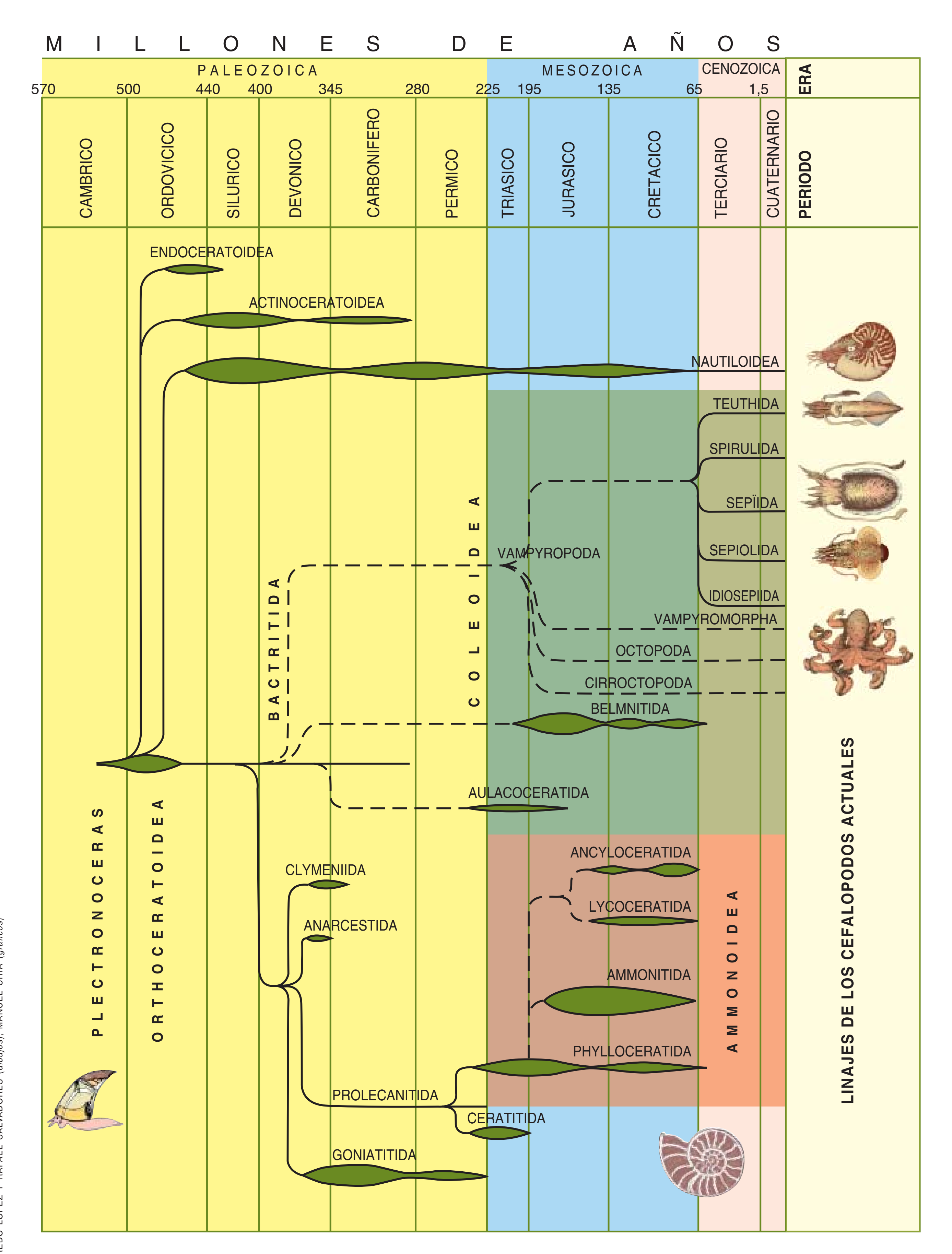
Los cefalópodos actuales habitan todos los océanos de la Tierra y muestran una variedad morfológica muy amplia, reflejo de la diversidad de ambientes a los que se han adaptado, desde fuentes hidrotermales profundas hasta aguas marinas someras, desde latitudes polares hasta el ecuador, y desde hábitats pelágicos hasta una vida cercana al fondo. Asimismo, muestran comportamientos tan complejos, que los asemejan más a los peces que a otros moluscos. Para ello gozan de un cerebro, unos órganos de los sentidos y unos efectores extraordinariamente capaces.

Los rasgos del ciclo biológico de los cefalópodos se hallan bajo control genético. Pueden caracterizarse por su influencia sobre el tiempo (t) que transcurre para que acontezca un período reproductivo o el que discurre entre más de uno de ellos, sobre la fecundidad (n) o el número de descendientes por progenitor, y sobre la supervivencia individual (s).

Los genes (o complejos de genes) que maximizan s y n, y minimizan t bajo el mayor número de circunstancias ecológicas posibles, tenderán a propagarse a expensas de otros genes de una población y a resistirse a ser desplazados por nuevas mutaciones. Se trata de la mera aplicación del concepto neodarwinista de éxito evolutivo. En la práctica, existen, sin embargo, varios límites para maximizar este factor. Uno de ellos, la presión de competencia y depredación. Otro límite lo establece la finitud de los recursos tróficos disponibles para asegurar un adecuado metabolismo. Limitante es el conjunto de restricciones impuestas por la organización, morfología y fisiología básicas de los moluscos; y, por fin, limitante es la cantidad de variación genética.

Arbol genealógico

Los cefalópodos forman un grupo de moluscos originado en el Cámbrico Medio o Superior, hace unos 535 millones de años (MA). Uno de los primeros grandes grupos provistos de concha externa (ectococleados) en aparecer fueron los nautiloideos, que surgieron a partir de un arqueogasterópodo (*Plectronoceras*) de concha



ALFREDO LOPEZ Y RAFAEL SALVADORES (*dibujos*); MANUEL UHIA (*gráficos*)

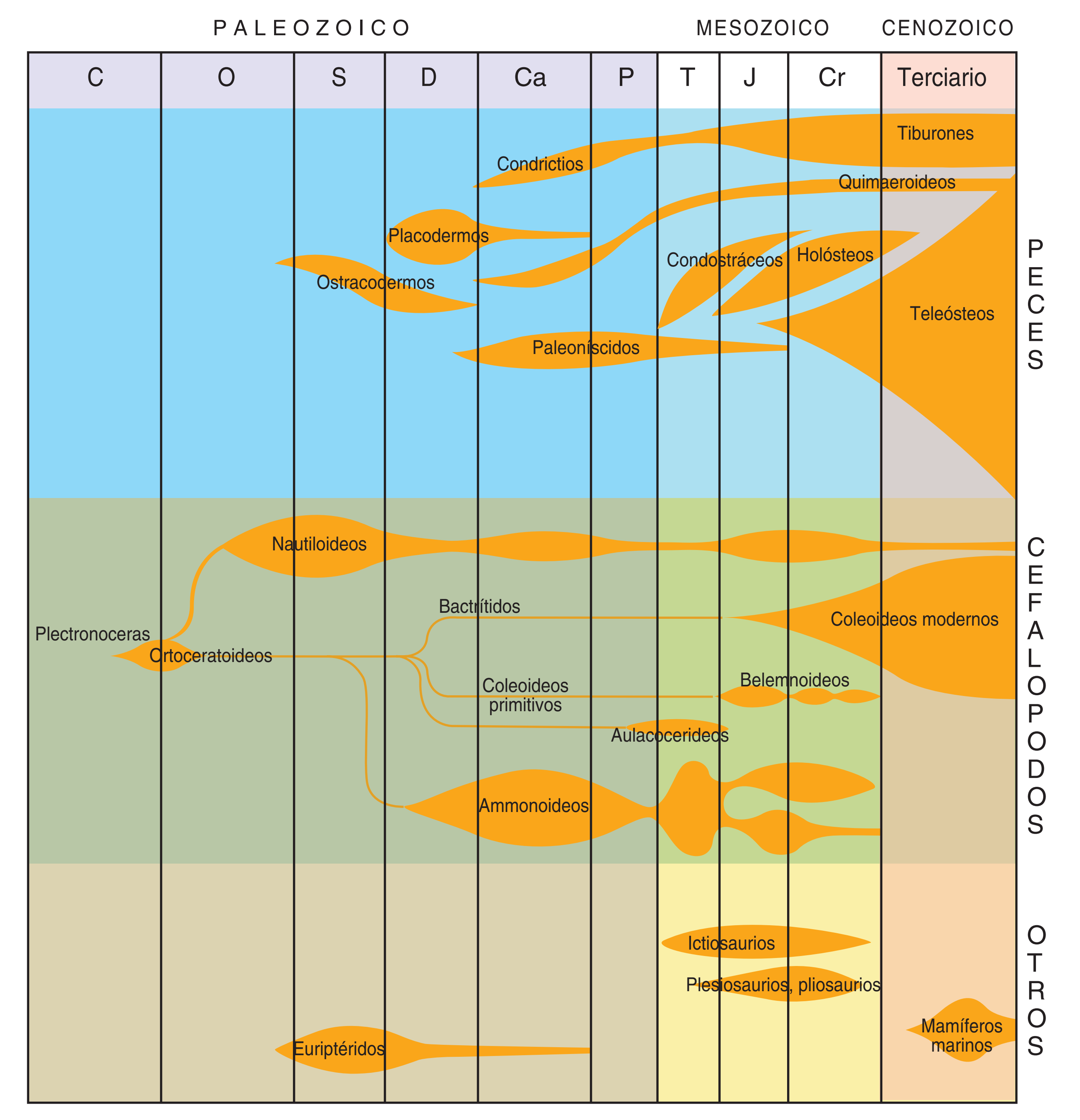
1. ARBOL GENEALOGICO de los cefalópodos.

recta. El rasgo adaptativo emergente más importante fue la formación del fragmocono, o cámaras llenas de gas dentro de la concha externa. Supuso eso el precintado hermético de la parte posterior de la concha con cámaras calcáreas, que se comunicaban con el resto del animal a través de un ramal carnoso. Este ramal, o incipiente sifúnculo, fue fundamental para permitir que las cámaras se llenasen de líquido.

El registro fósil revela que los nautiloideos conocieron una amplia radiación adaptativa en el Ordovícico (hace unos 450 MA). Se han identificado más de 200 géneros. Uno de los linajes exitosos, cuyo primer representante apareció en el Silúrico (hace unos 440 MA), dio lugar a los bactrítidos, antecesores de los ammonoideos y coleoideos.

Nautiloideos y ammonoideos gozaron de una diversidad parecida durante aproximadamente 175 MA en el Paleozoico. Aunque los ammonoideos fueron superiores en riqueza de formas y abundancia durante el Mesozoico (225-65 MA), se extinguieron a finales del Cretácico, mientras que los nautiloideos, cuya diversidad decreció durante el Terciario, perviven todavía con un género (*Nautilus*).

Los primeros coleoideos, linaje al que pertenecen los cefalópodos



2. COEVOLUCION DE LOS CEFALOPODOS y vertebrados marinos. Según se aprecia, la mayor radiación adaptativa de los coleoideos comenzó en el Mesozoico, cuando abundaban peces y reptiles marinos.

actuales, aparecieron en el Devónico Superior (355 MA) a partir de los bactrítidos. Los coleoideos fósiles mejor representados son los belemnoideos y los aulacoceratoideos, presentes ya al final del Paleozoico, pero cuya abundancia y variedad se multiplicaron en el Mesozoico. Se desconoce el origen de los grupos actuales de coleoideos; podrían haber surgido entre el Triásico superior y el Jurásico inferior (195-180 MA).

Las relaciones de parentesco entre los modernos órdenes de los cefalópodos actuales no se conocen bien. Se admite que los vampiromorfos se sitúan entre los teúthidos y octópodos; derivaron los segundos de un antecesor semejante a un vampiromorfo y divergieron hacia el Triásico de un linaje primitivo que dio lugar a todos los cefalópodos con diez apéndices alrededor de la boca. En ese linaje de los Decabrachia se inscriben los órdenes Spirulida, Sepiida, Sepiolida, Idiosepiida y Teuthida.

La amplia variabilidad estructural de los cefalópodos coleoideos actuales, comparada con la modesta variación de las conchas fósiles y sumada a la gran biomasa de los cefalópodos actuales, abona la tesis de que nos hallamos ante un máximo de su desarrollo evolutivo. Concepción que no comparten quienes ponen el énfasis en las 10.500 especies fósiles frente a las 700 vivientes.

Escenario evolutivo compartido

Además de llamar la atención sobre las semejanzas morfológicas y funcionales existentes entre los cefalópodos y los peces teleósteos, Packard defendió que la evolución de los primeros se encontró condicionada por las presiones de competencia y depredación ejercida por los peces y reptiles marinos, desde el Mesozoico en adelante.

En concreto, Packard sugirió que la radiación adaptativa de los peces y reptiles en las aguas costeras arrojó a los cefalópodos con concha externa de esos hábitats hacia la conquista de aguas más profundas y lejanas del litoral. Se perdió entonces la concha externa con cámaras, debido a los límites impuestos por la presión hidrostática que operaba sobre los espacios del interior de esos caparazones. Subsecuentemente, algunos de los nuevos coleoideos sin concha retornaron a aguas someras para competir de nuevo con los teleósteos. La propia extinción de los cefalópodos con concha externa, salvo *Nautilus*, corroboraba ese punto de vista.

El descubrimiento de presencia de coleoideos en el Devónico Inferior mostró, sin embargo, que cualquier presión por depredación sobre ellos debió ejercerse por vertebrados primitivos (euriptéridos) y, sobre todo, por peces primitivos (ostracodermos y placodermos). Basándose en esta y otras pruebas, se han modificado los términos del escenario descrito por Packard, proponiendo que ectococleados y coleoideos primitivos vivieron no sólo en zonas someras, sino también en aguas profundas durante el Paleozoico y el Mesozoico. A ello habría que añadir la posterior eliminación de las aguas poco profundas de los ectococleados. Aun cuando el tiempo de la influencia de la depredación en el escenario propuesto por Packard fuese erróneo, no faltan indicios sólidos de que la depredación constituye un factor crítico en la distribución de muchas de las formas de los cefalópodos actuales.

La presión por competencia y depredación ejercida por los reptiles marinos desapareció hace unos 65 millones de años, a finales del Mesozoico. Sin embargo, los mamíferos marinos, cuyos primeros representantes llegaron en el Eoceno (unos 55 MA), ocuparon paulatinamente su lugar.

Necesidad de una solución eficaz

Podemos admitir que el estilo de vida de los primitivos nautiloideos no difirió sustancialmente del que desarrollan los actuales nautilos, restringidos al Indopacífico. Podemos también aceptar que nuestros nautilos vivan a la manera de los ectococleados primitivos.

Aquí nos interesa subrayar los rasgos siguientes: sus *conchas externas*, que contienen mecanismos para regular la flotabilidad a partir de cámaras de aire internas; su *limitada capacidad de natación*, que les impide realizar extensas migraciones geográficas; su *estilo de vida solitario* y *epibentónico*, que se refleja en un comportamiento carroñero o depredador; su *maduración sexual*, cifrada entre los 4 y 6 años de edad, y su *puesta*, que consta de unos pocos huevos depositados sobre el sustrato; su *desarrollo embrionari*o, que dura cerca de un año si bien los recién nacidos son adultos en miniatura; su *crecimiento*, muy lento; su *longevidad* elevada, que alcanza hasta 20 años, y su *reproducción*, iterada varias veces durante su vida (sus gónadas se hallan sujetas a múltiples ciclos de maduración y reposo sucesivos).

Ante la intensa presión ejercida sobre los cefalópodos ectococleados primitivos por especies coetáneas de otros linajes (peces fundamentalmente, aunque también reptiles marinos), a través de la depredación, la competencia por fuentes de alimento comunes y la lucha por el espacio, ¿qué soluciones se les ofrecían a los cefalópodos para evitar la extinción?

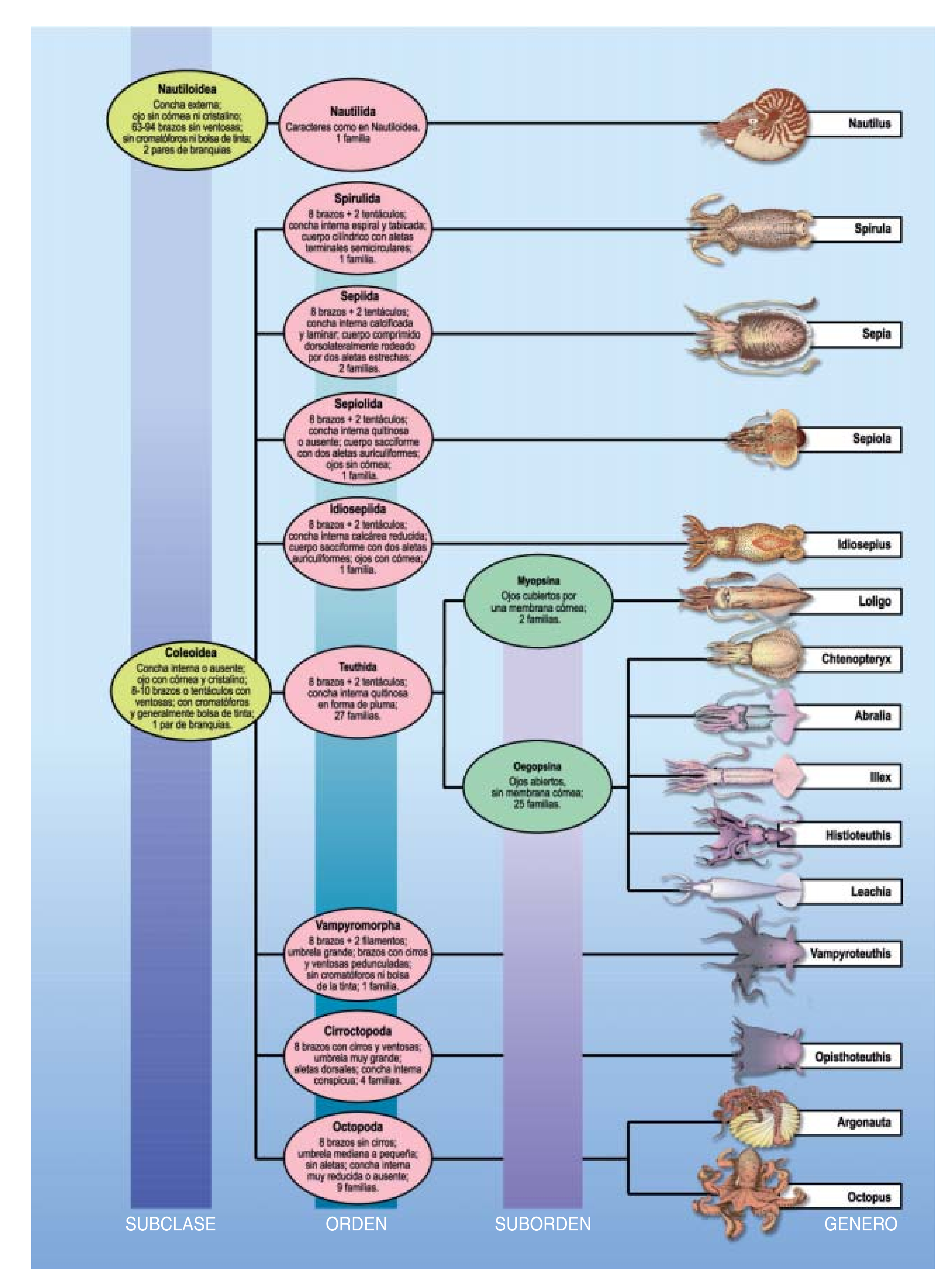
De entrada, procurar conservar su hábitat: mantener una tensión interna en los volúmenes de agua a los que estaban adaptados, que impidiese su ocupación por competidores. Podrían, asimismo, conquistar nuevos hábitats donde se relajase la presión externa de los competidores. Sin embargo, como esta última vía también era una posibilidad para los peces, y aprovechada según se demuestra con su impresionante radiación adaptativa, la situación, pasado un tiempo, volvería a ser la misma, es decir, un volumen ocupado por los cefalópodos, aunque sometido a la presión de competidores muy eficaces.

En ambos tipos de soluciones, el volumen total habitable por los cefalópodos resultaría siempre bastante restringido, incapaz de soportar un aumento demográfico constante de sus ocupantes.

Ante tal situación, una estrategia eficaz sería la que permitiera a los cefalópodos desplazarse con rapidez y a grandes distancias, incrementar su supervivencia individual (s), acortar el tiempo de maduración sexual (t) o el que discurre entre dos actos reproductivos, aumentar la fecundidad (n) y dejar los progenitores libre el volumen ocupado por ellos para sus descendientes. Según parece, en esa misma dirección actuó la selección natural durante el proceso evolutivo de los cefalópodos.

Evolución de los cefalópodos

El rasgo determinante de la evolución de los cefalópodos es el desarrollo



3. CLASIFICACION ACTUAL DE LOS CEFALOPODOS, donde se resaltan algunos de los géneros más importantes.

ALFREDO LOPEZ Y RAFAEL SALVADORES (*dibujos*); MANUEL UHIA (*gráficos*)

de mecanismos de flotación de baja presión. En la inclusión de un espacio con aire dentro de una concha difieren los cefalópodos primitivos del resto de los moluscos. Con ello, advino la capacidad de regular su flotabilidad, seguida por la interiorización y reducción de la cocha, así como el desarrollo de la musculatura paleal para la locomoción por propulsión a chorro.

Tales modificaciones exigieron un mayor aporte energético. Lo solucionaron con una reforzada capacidad de difusión de los gases a través de las branquias, mediante la formación de un sistema circulatorio cerrado, con pulsos cardíacos capaces de generar importantes gradientes de presión sanguínea, y aumentándose la eficacia de los procesos digestivos. El posterior internamiento y reducción o desaparición de la concha conllevó un aumento del tamaño y de la complejidad del cerebro, así como el desarrollo de órganos de los sentidos más eficaces. Todo ello dio lugar a la aparición de comportamientos complejos y, por ende, a una optimización de la supervivencia individual.

El gran coste de la propulsión a chorro presente en todos los cefalópodos actuales, además de ligarse a los cambios citados, se asocia con variaciones en las estrategias reproductoras. Se adelanta el tiempo (t) de la maduración o se acorta el intervalo entre períodos reproductores, aumenta la fecundidad (n), se deja antes libre el volumen ocupado y se reseñan altas tasas de crecimiento.

Los cefalópodos actuales, excepto *Nautilus*, muestran un repertorio de estrategias reproductivas que denotan una notable flexibilidad adaptativa. Las medidas van desde un desove simultáneo y masivo al final de la vida del animal hasta una freza continua durante una larga porción de su ciclo biológico. No existen ciclos múltiples de reposo y regeneración gonadal. Es decir, la mayoría de los cefalópodos vivientes maduran sexualmente sólo una vez en su vida.

Tales estrategias reproductoras se adaptan al grado de estabilidad del ecosistema y presiones demográficas sufridas durante los procesos evolutivos. Así, en ambientes de extrema inestabilidad predominan las especies en las que, pese a su dispar estilo de vida, la ovulación es sincrónica, la puesta monocíclica y la freza terminal y simultánea. En los ambientes estables, por el contrario, predominan especies con diferentes estilos vitales en los que la ovulación es asincrónica y la freza prácticamente continua. Obviamente, existe todo un conjunto de estrategias intermedias o un gradiente.

En segundo término, la fecundidad de la mayoría de los cefalópodos modernos, aunque muy variable, supera de lejos la de *Nautilus*. Su desarrollo embrionario es también mucho más breve. Por otra parte, los cefalópodos recién nacidos son adultos en miniatura, ausencia de metamorfosis que constituye otro rasgo característico de los cefalópodos. Merced al mismo aumenta la posibilidad de supervivencia individual y generacional.

Además, los cefalópodos actuales, excepto *Nautilus*, presentan unas tasas de crecimiento y unas tasas de ingestión y de eficiencia nutricional muy altas. En teoría, la tasa de crecimiento elevada disminuye la tasa de mortalidad natural en las fases tempranas debidas a depredación porque los individuos son de tamaño pequeño durante menos tiempo, reduciendo su vulnerabilidad.

Por último, la esperanza de vida de los cefalópodos actuales, de nuevo excepto en *Nautilus*, es muy breve. No suelen superar los dos años; ni trascienden los cinco las especies más longevas.

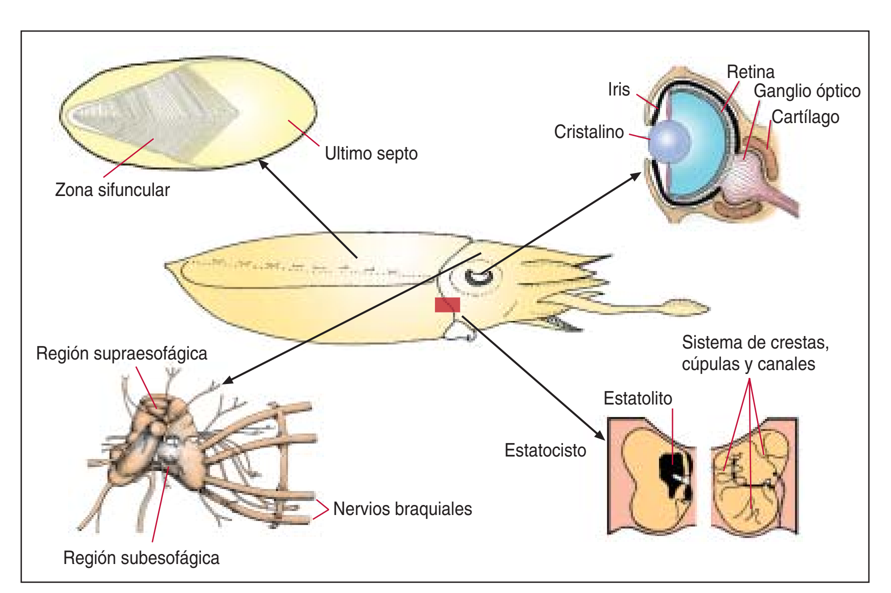
En definitiva, el estilo de vida que han adoptado la mayoría de los cefalópodos actuales es “vivir rápido y morir jóvenes”, en abierto contraste con los nautilos vivos, con los ectococleados ya extintos y con la mayoría de los peces, que crecen más lentamente y maduran varias veces a lo largo de su vida. Ese estilo y ritmo de vida habría permitido a los cefalópodos mantener la presión interna en los hábitats conquistados, en cuyo interior la tasa de renovación generacional es elevada y se dan sincronías, flexibles y muy aceptables, entre la eclosión de la progenie y las condiciones óptimas del ecosistema para asegurar su máxima tasa de supervivencia.

La solidez de este estilo de vida refleja unas reglas biológicas básicas, ligadas al material genético (ADN) de los cefalópodos.

Un escenario plausible

Entre el comienzo del Jurásico y finales del Cretácico, un período que abarca cerca de 130 millones de años, abundaban los ammonoideos y, en menor medida, nautiloideos. Provistos de concha externa, algunas de enormes dimensiones, que consistía en su principal defensa ante sus depredadores.

Coetáneos a estos cefalópodos ectococleados eran algunos coleoideos primitivos con rasgos modernos. Según el registro fósil, todavía eran



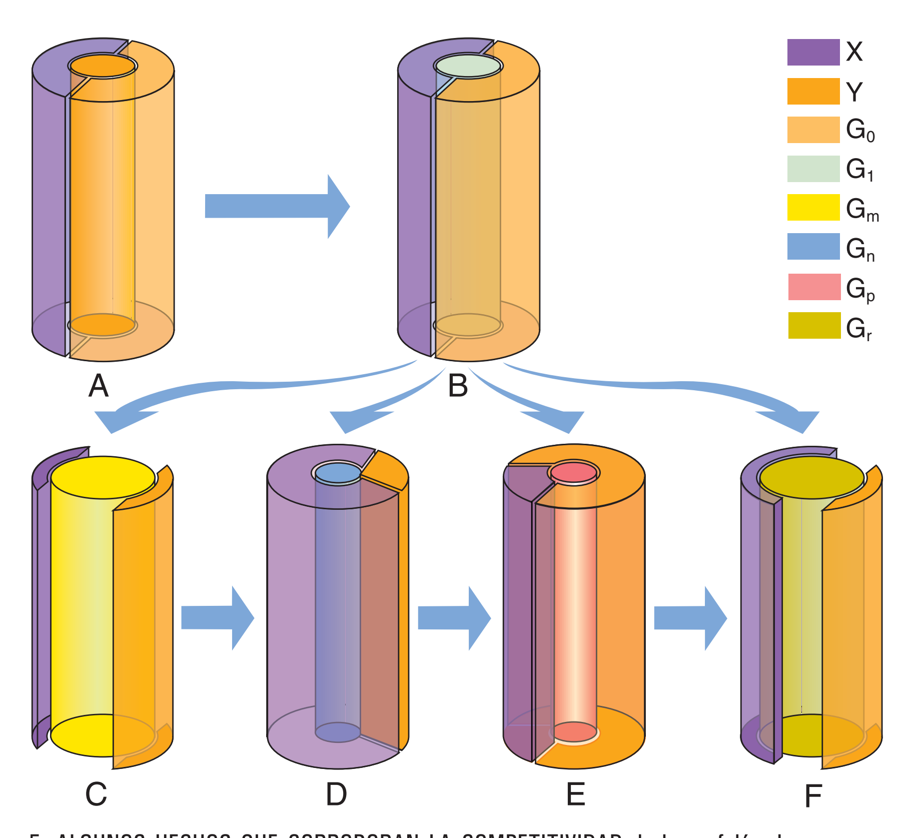
4. ENTRE LAS ADAPTACIONES sobresalientes de los cefalópodos merecen recordarse el internamiento de la concha, cerebralización y desarrollo de los órganos de los sentidos: ojos y estatocistos, como dos ejemplos.

ALFREDO LOPEZ Y RAFAEL SALVADORES

poco abundantes. Hacia finales del Cretácico, debido a cambios ambientales entre otras razones posibles, se produjo la extinción de los ammonoideos. Entre los nautiloideos sólo quedaron unas pocas especies.

El proceso de extinción sería lento, aunque inexorable. Algunas familias de ammonoideos habían desaparecido antes del final. Al par de ese declive, se asistía a la radiación más importante de coleoideos y teleósteos. La selección actuó en los cefalópodos y primó a formas móviles y desnudas, capaces de desplazarse con rapidez y a grandes distancias. Se produjo notable incremento de la supervivencia individual (*s*), se acortó el intervalo (*t*) hasta la maduración sexual o el transcurrido para una renovación completa de la biomasa poblacional.

Además, la avanzada cerebralización de coleoideos, su desarrollo de sistemas sensoriales y de complejas pautas de comportamiento les hacían más aptos para defenderse mejor de los teleósteos, que eran, y siguen siendo, sus más directos depredadores.



5. ALGUNOS HECHOS QUE CORROBORAN LA COMPETITIVIDAD de los cefalópodos actuales. Los diagramas muestran situaciones que confirman la competitividad y oportunismo de la mayoría de los cefalópodos actuales, cuyo estilo de vida les permite mantener la tensión interna dentro de los volúmenes ocupados (hábitats) frente a la presión externa del ambiente (X) y de los depredadores y competidores (Y), sustituyendo toda la biomasa de una generación (G_0) por la de la siguiente (G_1) en un período breve de tiempo, que puede variar entre 6 y 24 meses (A y B). Cuando la presión externa sobre el cilindro interior se relaja, por efecto de cambios ambientales favorables, eliminación de depredadores o ambos (C), el volumen ocupado por los cefalópodos aumenta en muy pocas generaciones ($G_1 \rightarrow G_m$; $t_m - t_1 < 4$ años). Cuando ocurre lo contrario, ya sea por aumento de la presión ambiental (D) o debido al incremento de la presión ejercida por los depredadores (E), la biomasa de cefalópodos disminuye notablemente *en pocas generaciones* ($G_1 \rightarrow G_n$, $G_1 \rightarrow G_p$ o G_r). En la situación F se representa un aumento de G_r por disminución de la presión de depredadores en breve tiempo ($t_r - t_1 < 4$ años). Los escenarios C y F pueden explicar lo acontecido en el banco sahariano y F es lo que parece haber ocurrido en las aguas de Galicia con *Illex coindetii* y *Merluccius merluccius*. Mientras D ocurre cada cierto tiempo en el Atlántico sudoeste, E aconteció en las islas Columbretes y en el golfo de Castellammare.

ALFREDO LOPEZ Y RAFAEL SALVADORES (*dibujos*); MANUEL UHIA (*gráficos*)

No obstante, cefalópodos y peces o, con mayor propiedad, sus antepasados, partían de tipos de organización muy diferentes: uno propio de invertebrados y otro de vertebrados. El linaje de los cefalópodos conduciría a un callejón evolutivo sin salida, mientras que el de los primitivos vertebrados alcanzaría un éxito enorme, ya que de su tronco partieron las ramas que dieron lugar a los anfibios, reptiles, aves y mamíferos, capacitados para abandonar el océano y conquistar la tierra firme. Podríamos hablar quizá de progreso, si los procesos evolutivos se contemplan desde la perspectiva de una gradual mejora en el almacenamiento y manejo de la información, sobre la base somática de sistemas nerviosos cada vez más eficaces y complejos.

Competitividad de los cefalópodos actuales

Si la selección del estilo de vida de los cefalópodos actuales los hubiese convertido en organismos eficaces a la hora de la tensión interna dentro de los hábitats ocupados, debería haber situaciones en las que la eliminación de las presiones externas (ambientes hostiles y depredadores o competidores) favoreciese una rápida expansión de los cefalópodos.

Esto es lo que parece haber acontecido en la costa de Africa centro-oriental, donde se registra un conocido afloramiento estacional que la convierten en una de las mayores pesquerías mundiales. Hasta principio de los sesenta, en la plataforma de esa región, que abarca aproximadamente desde el paralelo 21º N hasta el 26º N, existía una importante pesquería de peces de escama, compuesta por espáridos (pargos, sargos, dentones, etcétera) y corvinas. En esa pesquería, se obtenían también calamares (*Loligo vulgaris*), sepias (*Sepia officinalis* y *S. hierredda*) y pulpos (*Octopus vulgaris*), aunque en cantidades muy inferiores a la de los peces de escama y nunca en suficiente abundancia como para sostener una explotación industrial.

Sin embargo, desde comienzos de los sesenta, la situación cambió hacia ajustes en la composición de las comunidades. Se pasó de una predominancia de los peces a la de los cefalópodos en la biomasa total del ecosistema. Estos cambios pudieron

estar originados por una combinación de factores: desde variaciones ambientales no controladas por el hombre hasta variaciones en la estrategia pesquera debido a incentivos económicos.

En cualquier caso, mientras que las poblaciones de espáridos y otros peces desaparecieron de las descargas, las de cefalópodos, sobre todo de pulpo, experimentaron un incremento tal, que permitieron el desarrollo de una pesquería comercial. Aunque es imposible demostrar una relación de causa a efecto entre la disminución de los peces de escama, es decir, de competidores y depredadores de cefalópodos, y el aumento de éstos, la simultaneidad de ambos acontecimientos sugiere una significativa correlación negativa. El volumen que dejaron libre los peces de escama fue ocupado por los cefalópodos.

Un ejemplo opuesto al anterior sucedió en el Parque Nacional de las Islas Columbretes del Mediterráneo Occidental. Allí, después de años sin explotación pesquera en el interior de sus límites, la composición de la fauna bentónica experimentó un cambio en favor de un gran incremento de la abundancia de meros (*Ephinephelus guaza*) y de langosta (*Palinurus elephas*), en detrimento de las poblaciones de sepia y pulpo, otrora relativamente abundantes.

Otra prueba *a sensu contrario* la constituyen los datos obtenidos en un área de 200 km^2 del golfo de Castellammare, al noroeste de Sicilia. Se estableció una veda de cuatro años con vistas a su recuperación. Tras esa moratoria, la biomasa de cefalópodos disminuyó, en favor del incremento de nueve especies de peces demersales, muchas de ellas depredadoras directas de los cefalópodos y otras competidoras por una misma fuente de alimento.

Estos resultados, además de mostrar que un aumento de biomasa de los peces redujo la abundancia de varias especies demersales y bentónicas de cefalópodos, señalaron que sus capturas pueden ser más elevadas a niveles de explotación altos que a bajos, como se demostró también en las pesquerías de arrastre del banco sahariano, golfo de Tailandia y mar de Liguria.

Se ha atribuido ese fenómeno a dos rasgos peculiares de la estrategia vital de pulpos, calamares y potas, que son los cefalópodos más explotados: en primer lugar, porque su biomasa se renueva casi en su totalidad de una generación a la siguiente; en segundo término, por las altas tasas de supervivencia larvaria. No obstante, para este tipo de especies, donde el ciclo biológico es muy breve y los recién nacidos suelen atravesar una fase planctónica, la variabilidad ambiental debe tenerse muy en cuenta como factor coadyuvante.

No se agotan ahí los ejemplos de la alta competitividad y oportunismo de los cefalópodos. Repárese en las variaciones inversas que experimenta la abundancia de los omastréfidos *Illex argentinus* y *Martialia hyadesi* asociadas a episodios de El Niño o la relación inversa, observada a mediados de los ochenta, entre la abundancia de un depredador y su presa —la merluza (*Merluccius merluccius*) y el volador *Illex coindetii*— en las costas de Galicia. En todos los casos, los protagonistas serían unas pocas especies. Dada la riqueza de su radiación adaptativa, resultaría arriesgado generalizar este tipo de oportunismo expansivo a todos los cefalópodos actuales.

Capacidad adaptativa de los cefalópodos

¿Hasta qué punto ha estado la evolución del ciclo biológico de los cefalópodos limitada por las características propias del fílum Mollusca? Con lógica, podría decirse que la selección natural tendería a maximizar la tasa de crecimiento de los organismos, porque, manteniéndose otros aspectos constantes, ello maximizaría su tasa de desarrollo, reduciéndose el tiempo de maduración (t) y, posiblemente también, el período en el que las etapas de su ciclo biológico son más vulnerables, lo cual incrementaría su supervivencia (s).

Puesto que la tasa de crecimiento y los aspectos que contribuyen a ella, por ejemplo la maximización de la energía neta obtenida de los alimentos, son de fácil estimación, ese principio maximizador se ha usado a menudo como una medida fenotípica de la capacidad adaptativa, en estudios fisiológicos y etológicos. Sin embargo, lo mismo las limitaciones fisiológicas (los poiquilotermos no tienen crecimientos tan rápidos como los homeotermos) que las ecológicas (asociadas con supervivencias negativas provocadas por un crecimiento rápido) pueden impedir que se realice dicha maximización.

Comparando las tasas de crecimiento de diferentes taxones, se ha comprobado que las correspondientes a los cefalópodos se acercan más a las tasas de los mamíferos que a las propias de los vertebrados poiquilotermos. Posiblemente se hallan, salvo *Nautilus*, entre las mayores del reino animal. Se cumple, pues, el principio maximizador. Lo que no está tan claro es cómo se consigue, aunque debe guardar relación con un consumo de dietas ricas en proteínas y carbohidratos, rápida digestión, altas eficiencias de conversión de los alimentos y uso de la mayor parte de su energía y productos transformados en el crecimiento. Esa gavilla de características definen a los cefalópodos.

Muestran los cefalópodos una escasa capacidad para digerir, almacenar y movilizar los lípidos, acorde con la organización de su sistema digestivo y funcionamiento de sus vías metabólicas, propios de los moluscos. Para moverse con celeridad, un pez y un cefalópodo deben quemar mayor cantidad de materia: un cefalópodo ha de quemar 3 gramos de proteína para conseguir 12 kilocalorías, mientras que un pez consigue esa misma energía quemando sólo 2 gramos de lípidos.

Sin embargo, a pesar de la aparente menor eficacia que comporta extraer la energía de compuestos menos endergónicos, como proteínas y carbohidratos, que los lípidos, parece que las presiones selectivas de la evolución han favorecido un metabolismo muscular según el cual los cefalópodos maximizan el rendimiento del ATP por mol de oxígeno consumido. Quizá las mitocondrias de las células musculares de los cefalópodos prefiriesen combustibles como las proteínas y carbohidratos, cuya oxidación utiliza el oxígeno de forma más eficaz que los lípidos, al menos expresado en términos de rendimiento del ATP. Con otras palabras, los lípidos, cuyo uso del oxígeno es relativamente ineficiente, no serían los combustibles más adecuados para las reacciones catabólicas que se producen en las mitocondrias de las células musculares de los cefalópodos.



6. LA NEOTENIA, ORIGEN de ciertas adaptaciones de los cefalópodos. El origen de las características de los octópodos pelágicos gelatinosos de las familias Vitreledonellidae, Amphitretidae y Bolitaenidae, se deben a una neotenia. Las transformaciones morfológicas y funcionales en Ctenoglossa y cranquilurias son un ejemplo de convergencia adaptativa al medio pelágico.

ANGEL GUERRA

La hemocianina, una proteína con cobre en su núcleo metálico, es el pigmento respiratorio básico de los moluscos, cefalópodos incluidos. Su concentración está limitada por la viscosidad. La capacidad de transporte de oxígeno, baja, de la hemocianina varía según el estilo de vida del cefalópodo. *Nautilus* tiene una capacidad sanguínea de transporte de oxígeno de 2 vols. por ciento, mientras que es de 3,4 vols. por ciento en *Octopus* y de 4,3 vols. por ciento en *Loligo*. Esta baja capacidad de transporte podría parecer un freno a la radiación adaptativa de los cefalópodos, sobre todo comparándola con los peces, cuyo pigmento respiratorio es la hemoglobina, el cual, además de su mayor afinidad por el oxígeno, se encuentra en los hematíes y no disuelto en el plasma sanguíneo, como lo está la hemocianina.

Sin embargo, en los cefalópodos se han desarrollado unas branquias cuya superficie de captación de oxígeno supera las de peces de tamaño equiparable y de hábitats similares. Además, las laminillas branquiales de los cefalópodos experimentan sacudidas musculares periódicas, que constituyen un mecanismo de ayuda al paso del agua a través de sus finos canales y reducen las capas de frontera por la formación de flujos turbulentos, lo cual favorece el intercambio gaseoso. Por otra parte, dicho intercambio gaseoso está también asistido por el hecho de que muchas especies de cefalópodos son capaces de variar el volumen de sangre en sus branquias: muestran mayores volúmenes durante los períodos de más intensa actividad, cuando se precisa más oxígeno. Ello requiere la existencia de un corazón preparado para bombear grandes volúmenes de sangre, como es el corazón sistémico de los cefalópodos. En esa tarea se sirve, además, de dos bombas auxiliares o corazones branquiales.

La capacidad de bombeo del corazón experimenta un aumento de cinco veces desde *Nautilus* a *Loligo*, en relación directa con la frecuencia de sus latidos. A partir de un pigmento de menor eficacia que el de los vertebrados, los cefalópodos han desarrollado adaptaciones que les capacitan para maximizar la utilización del oxígeno. Merced a ellas, han pervivido incluso en sistemas marinos donde la concentración de oxígeno disuelto es, o fue, baja.

Formas y funciones de los cefalópodos modernos

La primera cuestión que quizá deba plantearse es cómo el plan general de organización corporal de este grupo de moluscos tan diverso, que incluye, entre otros, nautilos, sepias, calamares, potas y pulpos pelágicos y bentónicos, ha podido derivarse de un

antecesor semejante a un monoplacóforo, de acuerdo con la hipótesis evolutiva más aceptada.

Al fílum Mollusca le define la presencia de concha, manto y pie. Los cefalópodos comparten este modelo primigenio y muestran una estrecha afinidad con los gasterópodos (caracoles, babosas, lapas, etcétera). Sin embargo, en los cefalópodos actuales, excepto en *Nautilus,* se ha interiorizado la concha reduciéndose o perdiéndose; se ha habilitado el manto para realizar funciones nuevas relacionadas con la locomoción y la respiración; el pie se ha transformado en una corona de brazos y tentáculos prensiles alrededor de la boca (corona braquial) y un sifón.

Junto a estas importantes modificaciones, en los cefalópodos actuales se observan numerosas innovaciones sensoriales y nerviosas. Por citar las más sobresalientes: existencia de un sistema nervioso central complejo, asociado a un sistema nervioso periférico bien estructurado y con neuronas gigantes; presencia de unos ojos muy desarrollados; un sistema vestibular (los estatocistos) idóneo para informar sobre cambios de posición, aceleraciones lineales y angulares; numerosos quimiorreceptores y fotorreceptores externos, y la existencia de varios tipos de órganos luminosos.

Mediante la técnica de hibridación *in situ* con embriones de sepiola hawaiana (*Euprymna scolopes*) se ha examinado la expresión de modelos de desarrollo de ocho genes *Hox* relacionados con el complejo bucal. Los resultados muestran que genes *Hox* que se manifiestan correctamente (o genes *Hox* ortólogos) se han reclutado repetidamente y de muchas formas en el origen de las nuevas estructuras que se observan en los cefalópodos. Se demostró, por ejemplo, que la estructura de la corona braquial, del sifón, de los ganglios estrellados del manto y de las neuronas que regulan sus manifestaciones desde ganglios o lóbulos del sistema nervioso central son expresión de varios genes *Hox* que operan en coordinación durante el desarrollo embrionario de esa especie.

Los resultados obtenidos arrojan luz sobre la naturaleza molecular de los mecanismos que habrían dirigido los cambios morfológicos y funcionales de los cefalópodos. Podrían hallarse procesos similares para explicar la adquisición de huevos con una gran cantidad de vitelo. Esto, asociado a un disco germinal que experimenta una segmentación meroblástica formando una blástula discoidal, da lugar a un desarrollo tan modificado, que, a partir de los estados embrionarios, no se puede determinar el parentesco de los cefalópodos con los demás moluscos, ni la ausencia de las características fases larvarias (trocófora, veliger) de éstos.

Sin embargo, quizá no todos los mecanismos que podrían haber influido en la evolución de los cefalópodos estén gobernados por la selección natural a través de variantes genéticas. Muchos podrían haberse debido a alteraciones del desarrollo. Para analizarlo, debe integrarse la dimensión mecánica de los caracteres con su historia evolutiva.

Sabemos ya que determinadas adaptaciones observables en ciertos grupos de cefalópodos se han originado por mecanismos que suponen una sola alteración en el tiempo del desarrollo. La neotenia se encuentra entre las heterocronías más conocidas del reino animal. Un buen ejemplo es el de los octópodos pelágicos gelatinosos de las familias Vitreledonellidae, Amphitretidae y Bolitaenidae, donde se ha demostrado que los atributos larvarios han pervivido en los adultos. Estos cefalópodos de aguas templadas y tropicales presentan varias adaptaciones a un tipo de vida pelágico: cuerpos gelatinosos y transparentes, reducción del tamaño de los órganos internos, ojos pedunculados y órganos luminosos en varios taxones. Este tipo de mecanismos adaptativos se observa también en otros muchos organismos marinos que constituyen el plancton gelatinoso, entre los que se encuentran las cranquilurias, cefalópodos pelágicos de la familia Cranchiidae.

Un análisis mecanicista de esos caracteres podría inducirnos a pensar que se trata de grupos filogenéticamente relacionados. Nada más lejos de la realidad; los octópodos pelágicos gelatinosos, incluidos ya por Adolf Naef en un grupo común al que denominó Ctenoglossa, debido a su característica rádula, se encuentran mucho más emparentados con los octópodos bentónicos (Heteroglossa) que poseen paralarvas planctónicas, que con las cranquilurias, más próximas a los calamares comunes desde el punto de vista filogenético.

Las transformaciones morfológicas y funcionales en los Ctenoglossa y las cranquilurias reflejan una convergencia adaptativa al medio pelágico, acontecido paralelamente en dos linajes diferentes de los cefalópodos. Mediante los análisis basados en la secuenciación de varios genes del ADN mitocondrial, quedó demostrado el parentesco entre los Ctenoglossa y el resto de los Octopoda. La profunda divergencia que se observa entre los adultos de ambos grupos de Octopoda se debe a que las fases juveniles de los Ctenoglossa alcanzan su madurez sexual y permanecen durante toda su vida en el plancton, lo que, por diferentes razones, les ha proporcionado unas eficaces tasas de pervivencia.

El autor

Angel Guerra Sierra es doctor en biología por la Universidad de Barcelona, profesor de investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), director del departamento de Recursos Marinos y Ecología Marina y jefe del grupo de investigación Ecología y Biodiversidad Marina (ECOBIOMAR).

Bibliografía complementaria

A Review of Reproductive Strategies in Cephalopods. F. Rocha, A. Guerra y A. F. González en *Biological Reviews*, vol. 76, págs. 291-304; 2001.

Integrating Historical and Mechanistic Biology Enhances the Study of Adaptation. K. Autumn, M. J. Ryan y D. B. Wake en *The Quarterly Review of Biology*, vol. 77, n.º 4, págs. 383-408; 2002.

Cephalopod *Hox* Genes and the Origin of Morphological Novelties. P. N. Lee, P. Callaerts, H. G. de Couet y M. Q. Martindale en *Nature*, vol. 424, págs. 1061-1065; 2003.

Neotenous Origins for Pelagic Octopuses. J. Strugnell, M. Norman, A. J. Drummond y A. Cooper en *Current Biology*, vol. 14, n.º 8, págs. 300-301; 2004.

Los sarcomas, arquetipos de cáncer

Aunque raros, los cánceres de músculo, hueso o tejido adiposo portan los mismos errores moleculares que otros tumores. Ello les convierte en candidatos ideales para el descubrimiento de nuevas terapias

Igor Matushansky y Robert G. Maki

En 1996, una mujer finlandesa de 50 años que venía padeciendo leves dolores de estómago acudió a su médico en Helsinki. Le descubrió una enorme masa abdominal. Su estado fue empeorando. En exámenes posteriores se hallaron en su estómago tumores de entre 7 y 10 centímetros de diámetro, además de multitud de pequeños nódulos característicos de un cáncer en fase de expansión. Los cirujanos extirparon todo lo que encontraron. Aun así, el diagnóstico era desalentador: se trataba de un tumor de la estroma gastrointestinal (GIST), un cáncer del tejido conjuntivo del intestino que, inevitablemente, tendría consecuencias mortales si la cirugía fallaba.

Dos años después, el cáncer reapareció. Los cirujanos volvieron a intervenirla para extirpar unos bultos en el hígado y en la pared abdominal. Ese mismo año, en otra operación se extirparon más tumores en el hígado y en el ovario. Los médicos trataron de frenar la proliferación celular con una avalancha de sustancias quimioterapéuticas combinadas (durante cinco meses se sometió a siete ciclos en los que se utilizaron cuatro medicamentos distintos), aunque sin éxito. A medida que el cáncer avanzaba, bloqueaba el intestino. Ello requirió una nueva operación. Cuando los cirujanos intentaron cortar el bloqueo, se encontraron con otros 45 tumores, que hubo que extirpar. La paciente comenzó a tomar grandes dosis diarias de dos fármacos punteros que reforzaban el sistema inmunitario. El efecto fue magro.

Habiendo agotado otras posibilidades, el oncólogo de la mujer, Heikki Joensuu, del Hospital Clínico de la Universidad de Helsinki, sugirió la administración de un medicamento experimental, el STI571, que acababa de pasar a la fase I en los ensayos contra la leucemia mielógena crónica, un tipo de cáncer distinto del que padecía su paciente. Constituía un intento desesperado de salvarle la vida; pese a la falta de datos clínicos que lo avalaran, el hospital lo autorizó.

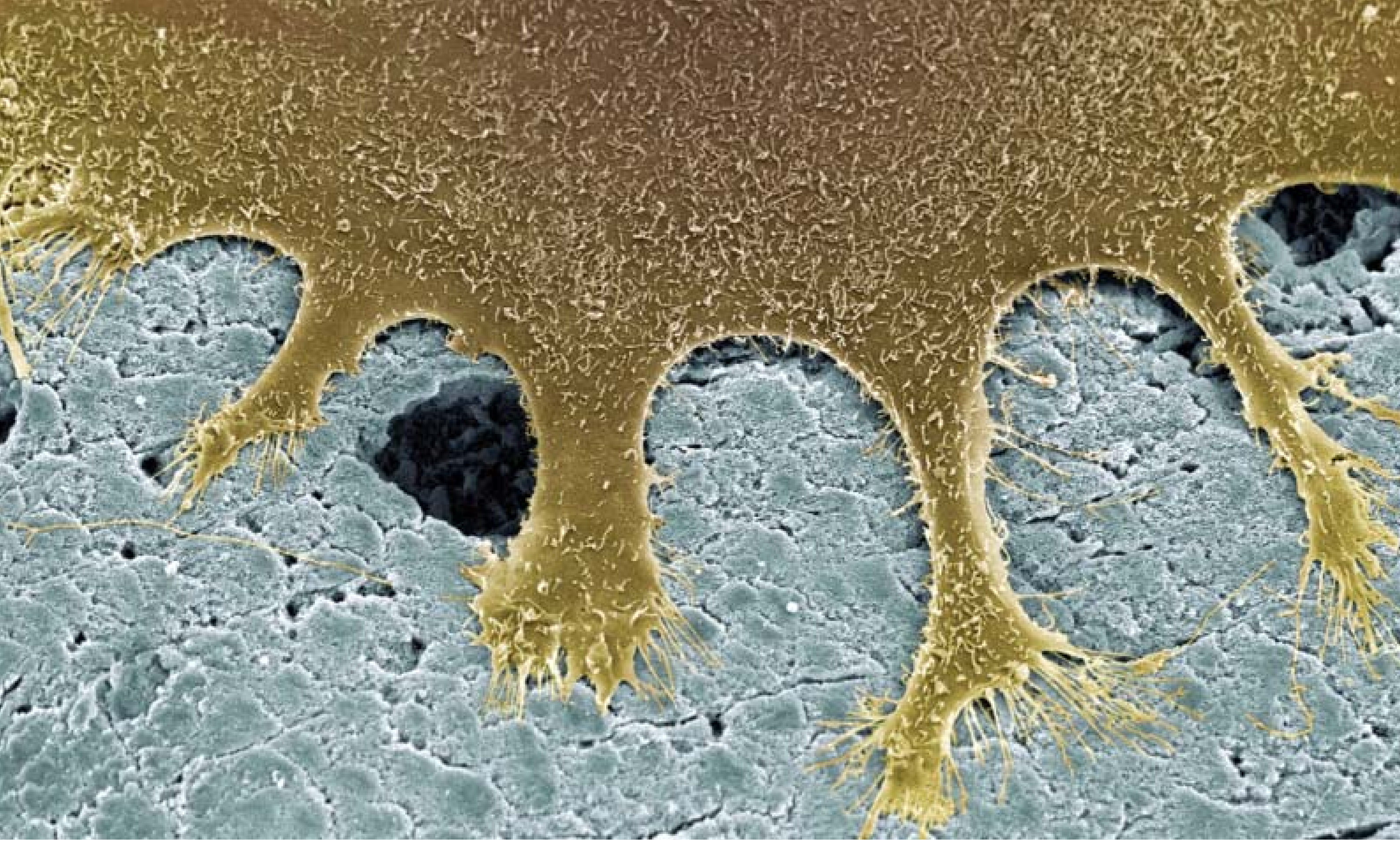
Dos semanas después, una prueba de resonancia magnética mostró una reducción del 40 por ciento en los tumores. Dos meses más tarde habían vuelto a reducirse otro tanto. A los ocho meses, su tamaño seguía disminuyendo; alrededor de la cuarta parte eran ya indetectables. Y no sólo eso, las células tumorales residuales habían dejado de dividirse y ya no presentaban las alteraciones moleculares propias de un cáncer. La mejoría fue increíble.

¿Qué llevó a Joensuu a decidirse por este fármaco? La respuesta reside en la base molecular del GIST: la proteína anómala que provocaba el tumor de su paciente guardaba semejanza con la que originaba la leucemia para la cual se había aprobado el medicamento. Además, algunos estudios indicaban que el STI571 funcionaría en ambos tipos de proteínas (al menos en una placa de cultivo). Al final, parte importante de este éxito debe atribuirse a la colaboración de un gran número de expertos: médicos y científicos de Helsinki, de la Universidad de Turku, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, de Harvard, de la Universidad de Ciencias de la Salud en Oregón y de la compañía farmacéutica Novartis, que había fabricado el compuesto (denominado ahora imanitib y comercializado bajo el nombre de Gleevec).

¿Constituye este medicamento la tan anhelada “bala mágica”, es decir, la cura para todos los tipos de cáncer? No. Pero el caso muestra cómo los descubrimientos obtenidos en los laboratorios de investigación se explotan rápidamente en la práctica clínica. Puede considerarse un fruto adelantado de lo que promete ser una enorme cosecha de avances médicos derivados de dos decenios de acelerados progresos en el campo de la biología celular. Aunque nunca se es suficientemente precoz.

Divide y vencerás

En 2005, en EE.UU., se diagnosticó cáncer a casi dos millones y medio de personas; de ellas, unas 570.000 murieron. El cáncer se convirtió en la principal causa de



1. DESDE LA DISTANCIA, EL CANCER PARECE UNA UNICA ENFERMEDAD: células que se dividen de forma incontrolada y desordenada. De cerca, en cambio, presenta una gran diversidad: no sólo porque afecta a varios tejidos, sino porque la transformación de una célula normal en cancerosa se debe a distintas alteraciones génicas. Los sarcomas (una clase de tumor poco común) representan una parte considerable de esa diversidad; muchas de las mutaciones que provocan sarcomas originan también otros tipos de cáncer. Por ello el sarcoma se utiliza como modelo en numerosos estudios de la base molecular del cáncer. Esta imagen coloreada de forma artificial corresponde a una micrografía electrónica de barrido de un tipo de sarcoma: un tumor de células gigantes de hueso (*marrón*) invadiendo tejido óseo sano (*gris*).

SPL/PHOTO RESEARCHERS, INC./*American Scientist*

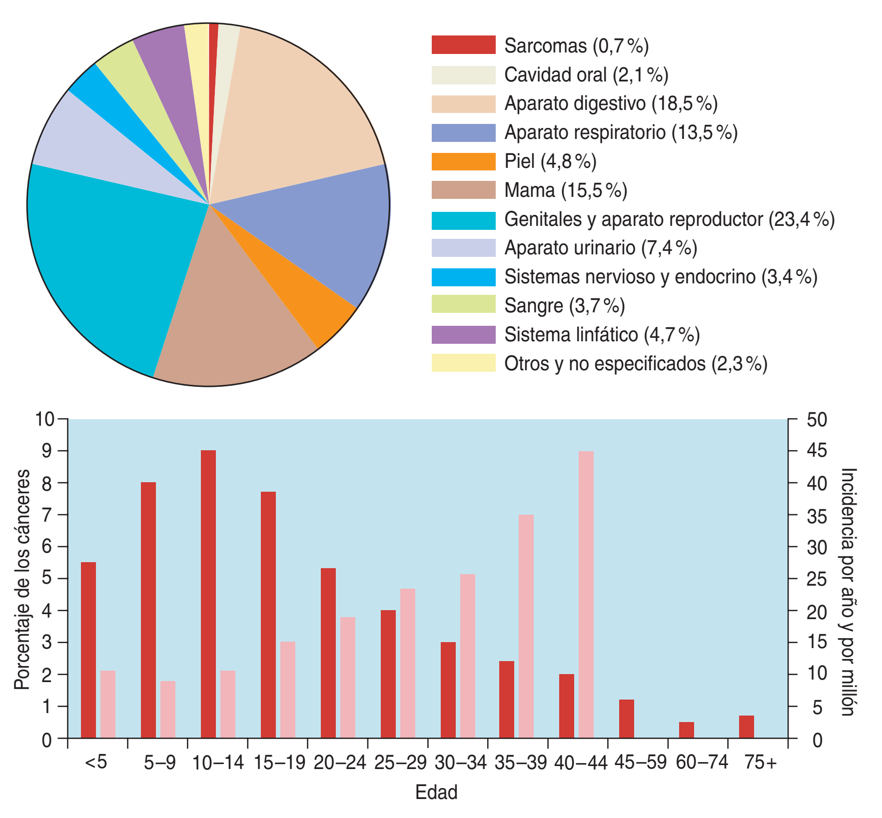
muerte en individuos menores de 85 años, por encima de las enfermedades coronarias. Aunque las cifras resultarían todavía más impresionantes si no fuera por la medicina moderna, los tratamientos distan todavía de haber alcanzado un nivel adecuado.

La cirugía, la radioterapia y la quimioterapia constituyen los tres pilares del tratamiento contra el cáncer. De estos tres, la quimioterapia es la menos discriminatoria. Mientras que la extirpación quirúrgica y la radioterapia tienen un efecto localizado, la quimioterapia mata a las células en división en cualquier parte del organismo. Esta se basa en la hipótesis de que las células que se dividen con frecuencia (normalmente las cancerosas) deberían resultar las más afectadas. En algunos casos (en leucemias, por ejemplo), el tratamiento resulta eficaz. Los cánceres que no crecen rápidamente, en cambio, muestran resistencia a la quimioterapia. Además, también las células normales que se dividen con frecuencia (las de los folículos pilosos y las del revestimiento intestinal, por ejemplo) se destruyen, lo que provoca la caída del cabello y diarrea. Existen medicaciones adicionales que alivian algunos de estos efectos secundarios; sin embargo, no resuelven el problema fundamental: la falta de especificidad.

Aunque las nuevas terapias basadas en los avances de la biología molecular han empezado a llegar a la práctica clínica, el objetivo de la oncología buscado con ahínco, un tratamiento eficaz y, a la vez, específico para las células cancerosas, sigue sin alcanzarse. Antes bien, a medida que ahondamos en los numerosos cambios fisiológicos que diferencian a los diversos tipos de cáncer entre sí y a las células cancerosas de las sanas, la obtención de un tratamiento eficaz parece estar más lejos que nunca.

La heterogeneidad que existe entre los cánceres se refleja en los *sarcomas*. Estos tumores raros presentan una elevada diversidad; ello les convierte en buenos candidatos para el estudio de terapias contra otras enfermedades malignas. Sólo en EE.UU., más de una docena de hospitales se han especializado en la investigación y el tratamiento de los sarcomas.

La palabra "σαρκωμα" aparece en los escritos del médico y filósofo Galeno, que vivió en la segunda mitad del siglo II después de Cristo. En griego, el término *sarcoma* designa una protuberancia carnosa. Hoy se aplica a los cánceres de hueso, músculo, tejido adiposo, cartílago y otros tejidos conjuntivos. En los EE.UU., cada año se diagnostican unos 10.000 nuevos casos de sarcoma, que abarcan 50 tipos distintos



2. LOS SARCOMAS CONSTITUYEN UNA VARIEDAD DE CANCER poco común. En 2005, representaron menos del uno por ciento de los diagnósticos de cáncer en EE.UU. (*arriba*). Sin embargo, su prevalencia es mayor entre la población infantil. Exceptuando el sarcoma de Kaposi (que se limita a los más ancianos o a pacientes con el sistema inmunitario hundido), el porcentaje de casos de sarcomas de tejidos blandos es máximo entre los individuos de entre 10 y 14 años de edad (*barras rojas*). En términos absolutos, en cambio, son los ancianos quienes tienen mayor probabilidad de padecer sarcomas de los tejidos blandos (*barras rosas*), pues contraen cáncer con mayor frecuencia que los jóvenes. El número de diagnósticos en función del tipo de tejido procede del libro *Cancer: Facts and Figures 2005* publicado por la Sociedad Americana contra el Cáncer. Se excluyen el carcinoma de células basales y el de células escamosas (dos cánceres de piel). Las incidencias absoluta y relativa de los sarcomas en función de la edad del paciente proceden del artículo que K. H. Albritton publicó en 2005, basado en datos obtenidos entre 1975 y 1999. La incidencia absoluta en personas mayores de 45 años no estaba incluida en ese informe, aunque otros estudios demuestran que este valor sigue creciendo con la edad.

RUSSELL HOUSE/*American Scientist*

de cáncer, cada uno con una biología característica.

Puesto que cada variedad de sarcoma afecta a un número restringido de individuos, no suelen realizarse estudios que requieran una muestra de pacientes amplia (búsquedas a gran escala de genes de susceptibilidad o grandes ensayos aleatorios). La investigación sobre los mecanismos patológicos de esta enfermedad se funda en estudios reducidos llevados a cabo a escala celular. Merced a ello se sabe más sobre cómo operan los sarcomas de lo que su escasa incidencia podría sugerir. Es probable que los ensayos clínicos para el tratamiento del sarcoma pongan de manifiesto resultados moleculares obtenidos en los experimentos de laboratorio.

En el Centro del Cáncer Memorial Sloan-Kettering de Nueva York nos proponemos ahondar en los procesos que originan los sarcomas y aprovechar ese conocimiento para el desarrollo de nuevos tratamientos. Nuestro trabajo y el de nuestros colaboradores han dado lugar a varias terapias contra determinados sarcomas. Algunas han resultado eficaces también contra tumores comunes, así en algunos cánceres de pulmón. Destacaremos aquí algunos avances.

Translocación cromosómica

Lo mismo que otros tipos de cáncer, los sarcomas son el resultado de mutaciones génicas. Se manifiestan de múltiples formas. Un tipo particular de error génico, la *translocación cromosómica*, es el responsable de varios sarcomas.

Un cromosoma consta de una hebra larga de ADN (longitud que multiplica miles de veces el diámetro de una célula). Cuando una célula humana se dispone a dividirse, copia cada uno de sus 23 pares de cromosomas de suerte tal, que cada célula hija recibe una dotación génica completa. En ocasiones, durante el proceso se rompe una hebra de ADN. En general, la célula repara tales fracturas; si no lo logra, activa el mecanismo de autodestrucción que provoca la *apoptosis*, o muerte celular programada. En algunos casos, sin embargo, la célula une de forma incorrecta dos o más cromosomas, dando lugar a una *translocación*. Si ésta elude su propia apoptosis, las células hijas heredan demasiadas copias, o demasiado pocas, del fragmento cromosómico en cuestión. Además, si el ADN se rompe y se repara de forma incorrecta en una región que especifica una proteína, esa valiosa porción del código genético —ese gen— puede quedar inutilizado, dejando a la célula con una sola copia, la que permanece en el cromosoma intacto de la pareja. Otra posibilidad es que el ADN reparado de forma incorrecta codifique una "proteína de fusión", constituida por las secuencias de dos genes fusionados en uno solo. Muchas de estas proteínas de fusión son sencillamente inútiles; algunas, en cambio, pueden resultar peligrosas. Si la proteína original operaba en algún proceso decisivo, como la regulación de la división celular, la proteína de fusión acarreará serios problemas.

Tales episodios de "corte y confección" no ocurren al azar; determinadas translocaciones originan ciertos tipos de cáncer. La herencia anormal de una copia extra del brazo largo del cromosoma 12, por ejemplo, provoca una de las versiones habituales del liposarcoma, cáncer de los tejidos blandos. Gracias a los recientes avan-

ces en el análisis del "perfil génico" (técnica que evalúa la actividad de los genes), se ha identificado la causa de una variante de este sarcoma: el liposarcoma desdiferenciado.

Con dos copias normales del cromosoma 12 más el fragmento extra, las células fabrican un exceso de la proteína que codifica uno de los genes residentes: el gen quinasa 4 dependiente de la ciclina o, en su forma abreviada, *CDK4*. Como su nombre indica, la proteína CDK4 corresponde a una *quinasa*, una enzima que añade grupos fosfato a otras proteínas para controlar su actividad. Se da la circunstancia de que opera también sobre uno de los interruptores principales de la división celular, el "supresor de tumores del retinoblastoma", o RB, que actúa a través de E2F, una proteína que se une al ADN. Un exceso de CDK4 hace que RB presente un exceso de grupos fosfato, con lo que el interruptor de la división celular se queda atascado en la posición de "conectado", una señal de cáncer.

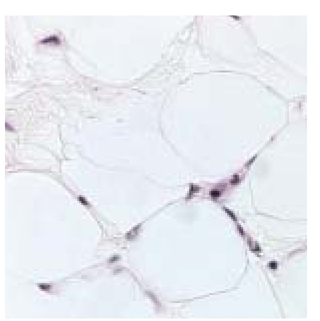
Una vez desentrañada esta cadena de sucesos, se pensó que el bloqueo de CDK4 podría aminorar la proliferación del liposarcoma. Uno de los medicamentos candidatos es el flavopiridol, que inhibe a varias quinasas, incluida la CDK4. Gary K. Schwartz y Samuel Singer, del Memorial Sloan-Kettering, han demostrado que este fármaco destruye los liposarcomas en placas de cultivo, así como en ratones portadores de liposarcomas humanos. En la actualidad, se está ensayando el flavopiridol para el tratamiento de diversos tipos de cáncer.

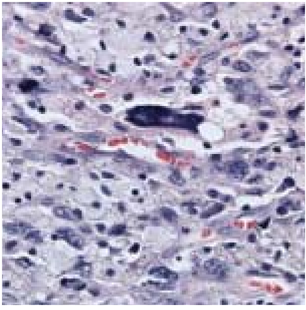
Inmunoterapia

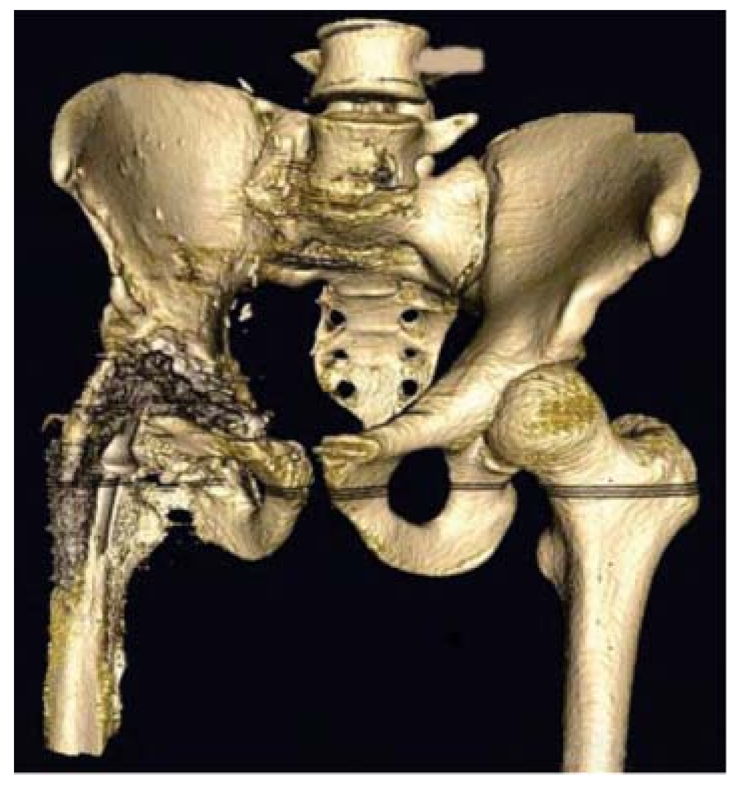
Algunos tumores producen proteínas características. Los melanomas, por ejemplo, fabrican gran cantidad de melanina (un pigmento) y moléculas afines. Por tanto, enseñar al sistema inmunitario del paciente a atacar dichas proteínas (mediante una vacuna, por ejemplo) ayuda a que el cuerpo identifique las células malignas y se libre del cáncer. El proceso de enseñar al sistema inmunitario a fabricar anticuerpos contra proteínas específicas del cáncer (o, en el caso de la melanina, proteínas cuya abundancia aumenta con el cáncer) se denomina inmunoterapia.

Los sarcomas son candidatos excelentes para la inmunoterapia porque muchos presentan translocaciones cromosómicas que originan proteínas de fusión que no aparecen en ninguna otra célula del organismo. Por tanto, el sistema inmunitario ataca estas moléculas extrañas (y las células cancerosas que las contienen) sin dañar el tejido sano. Por supuesto, el reconocimiento como foráneas de las proteínas mutantes no se produce de forma automática. Si así fuera, el tumor jamás hubiese aparecido. Parte del problema reside en el acceso: es posible que las proteínas anormales nunca aparezcan sobre la superficie de la célula y que sólo estén presentes en su interior, burlando la vigilancia del sistema inmunitario. Por suerte, en algunos casos las proteínas de fusión aparecen sobre la membrana celular, si bien en cantidades insuficientes para provocar la activación del sistema inmunitario. Por tanto, el desafío se reduce a generar anticuerpos contra estas proteínas específicas del cáncer. Hace pocos años, un grupo dirigido por Akinobu Matsuzaki, de la Escuela de Medicina para Graduados de Fukuoka, lo consiguió.

El equipo japonés estaba tratando una niña de 11 años que padecía un sarcoma sinovial que se había extendido a otras partes del cuerpo. Comenzaron por recolectar y aislar *células dendríticas* de la propia paciente, una parte del sistema inmunitario cuyo cometido consiste en engullir los microbios invasores,

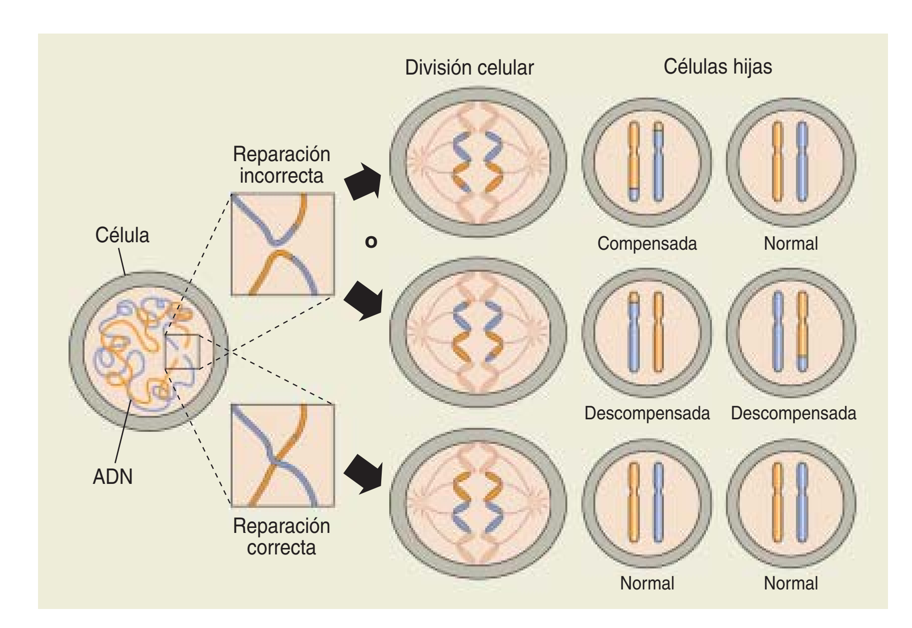






3. LOS ADIPOCITOS NORMALES (*arriba, a la izquierda*) se caracterizan por su gran tamaño, vacuolas de almacenamiento y núcleos dispersos (*teñidos de púrpura*). Las células de un liposarcoma en fase avanzada, en cambio, se encuentran densamente empaquetadas (*arriba, a la derecha*). Las células se muestran con 400 aumentos. Los sarcomas constituyen una forma de cáncer particularmente invasiva, por lo que en los tratamientos quirúrgicos suele extirparse tejido sano de los alrededores para evitar que queden células malignas. En algunos casos, el destrozo se mitiga mediante reconstrucciones quirúrgicas. La imagen de la derecha muestra una proyección tridimensional de barridos de tomografía axial computerizada (TAC) de un paciente con osteosarcoma al que se le implantó un injerto de hueso y se le sustituyó por completo la articulación de la cadera derecha.

CORTESIA DE CARLOS CORDON CARDO, CENTRO DEL MEMORIAL SLOAN-KETTERING DE ONCOLOGIA (*microscopias de tejido adiposo*); CORTESIA DE EDWARD Y. CHENG, UNIVERSIDAD DE MINNESOTA (*TAC*)/*American Scientist*



4. CUANDO UNA CELULA SE DISPONE A DIVIDIRSE debe copiar el ADN que constituye cada cromosoma; ambas células hijas reciben, pues, una dotación génica completa. En ocasiones, durante este proceso se rompen las hebras de ADN. En general, la célula vuelve a unir los extremos sin que se produzcan lesiones permanentes. En algunos casos, sin embargo, la célula repara la rotura de forma incorrecta; entonces las células hijas heredan una translocación cromosómica, en la que porciones de dos cromosomas distintos se encuentran intercambiadas. Cuando esto sucede, las consecuencias pueden ser más o menos dañinas en función del reordenamiento aleatorio de los cromosomas en la progenie celular. Las translocaciones descompensadas dan lugar a demasiadas copias de algunos genes y demasiado pocas de otros; las translocaciones compensadas pueden o no causar problemas según el lugar donde se ha producido la rotura. Las translocaciones tienen lugar en numerosos tumores, pero son comunes sobre todo en los sarcomas.

BARBARA AULICINO/*American Scientist*

trocearlos y exhibir los fragmentos sobre sus membranas externas. (Este desmembramiento permite que otro tipo de células inmunitarias, las células B, fabriquen anticuerpos que reconozcan cada fragmento o *antígeno*). En aquella paciente, una translocación de uno de los cromosomas X y un cromosoma 18 había fusionado dos genes: codificaban una proteína singular. En el laboratorio, se combinaron las células dendríticas con esa proteína; luego, reintrodujeron las células "estimuladas" a la paciente. El sistema inmunitario de la niña comenzó a reconocer al sarcoma. El tratamiento contuvo de modo temporal la proliferación del cáncer, que ya se había extendido hasta el pulmón. Aunque estos resultados no se han sometido todavía a ninguna prueba sistemática, la sólida lógica científica subyacente y los éxitos individuales (como el de la paciente de Matsuzaki) han servido de acicate para la puesta en marcha de docenas de ensayos clínicos en los que se utilizan las células dendríticas del propio paciente para tratar casos avanzados de cáncer de riñón, próstata, mama, colon y pulmón.

Sarcoma infantil

En 1997, Edmond S. Massuda y sus compañeros del Hospital Infantil de la Universidad de Wisconsin, en Madison, publicaron una serie de experimentos con *rabdomiosarcoma alveolar*, el sarcoma de tejidos blandos más común en niños. Se caracteriza por una translocación de los cromosomas 2 y 13 que fusiona los genes *PAX3* y *FKRH*, ambos codificadores de *factores de transcripción* (proteínas que se unen al ADN para activar o desactivar otros genes). En condiciones normales, la proteína PAX3 organiza el desarrollo embrionario del músculo; FKHR se encuentra ampliamente distribuida. La proteína de fusión resultante hace que las células musculares permanezcan inmaduras y, por tanto, expuestas a otros procesos inductores de cáncer.

Los investigadores demostraron que a la hora de activar los genes regulados por PAX3, esta proteína de fusión es unas cien veces más eficaz que la propia PAX3. Aprovecharon esta propiedad: modificaron el gen de la toxina A de la difteria (un potente veneno para las células) de forma que se activara sólo en presencia de la proteína de fusión. Luego, añadieron ese ADN tan cuidadosamente manipulado a cultivos de distintas líneas celulares, algunas de las cuales eran portadoras del gen mutante *PAX3-FKHR*. En efecto, el ADN añadido provocó la muerte selectiva de las células que sintetizaban la proteína de fusión. Además, cuando añadieron el gen fusionado a células normales, éstas también morían en presencia de la toxina regulada por PAX3. Si bien la idea de inyectar genes de toxinas en los pacientes y confiar en que un fragmento de ADN adyacente les impida causar daños en el resto del organismo puede parecer temeraria, los resultados de tales experimentos mueven a esperar que los efectos sean específicos del tumor.

Lo mismo que el cáncer que Massuda está intentando curar, el sarcoma de Ewing corresponde a uno de los tumores del tejido conjuntivo más comunes en niños y en jóvenes. Suele afectar al hueso, no a los tejidos blandos. Se origina a raíz de una reorganización cromosómica: en este caso, la fusión de un gen del cromosoma 22 con uno del cromosoma 11. La proteína resultante transforma en cancerosas las células óseas normales. En el laboratorio, las células óseas cultivadas proliferan rápidamente cuando se les añade la proteína de fusión; cuando se retira, en cambio, dejan de dividirse. Ello convierte a la proteína aberrante en una diana terapéutica ideal.

Una nueva técnica fundada en el ARN interferente pequeño (ARNsi, de "small interference RNA") permite a la célula librarse de una proteína concreta. En 2004, un equipo liderado por Howard A. Chansky, de la facultad de medicina de la Universidad de Washington en Seattle, empleó con éxito esta herramienta (potente y específica a la vez) para eliminar la proteína de fusión responsable del sarcoma de Ewing. Se basa en utilizar multitud de fragmentos cortos de ARN que portan la secuencia comple-

mentaria al ARN mensajero del gen fusionado. El ARN interferente se une a su diana para crear una molécula de doble hebra que la célula escinde al interpretar que se trata de un virus. En ausencia del ARN molde, no se pueden fabricar nuevas copias de la proteína de fusión; las copias existentes no tardan en degradarse. Mediante esta estrategia, Chansky y sus colaboradores silenciaron el gen mutante en células de sarcoma de Ewing cultivadas, deteniendo con ello su proliferación. Estos resultados representan la primera utilización de un ARNsi dirigido hacia el ARN que fabrican las células cancerosas. Un enfoque que conducirá, sin duda, a nuevas terapias.

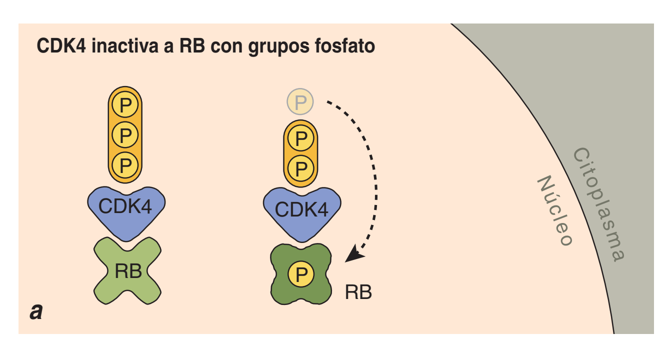
El origen del GIST

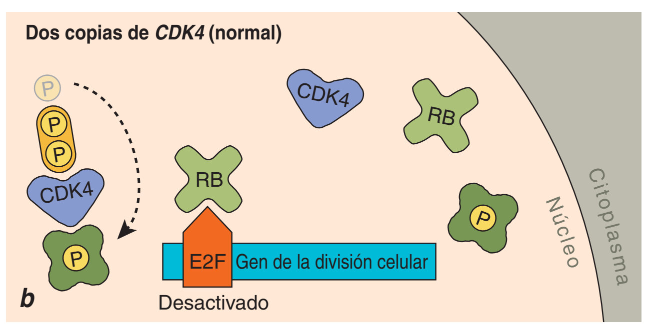
Aunque el ARNsi y otras vías experimentales de lucha contra el cáncer similares se hallan todavía muy lejos de entrar en la práctica clínica, el uso del imanitib para el tratamiento del GIST (disparado a raíz de la recuperación de la mujer finlandesa) ha recibido aprobación para su aplicación en determinados casos avanzados. ¿Cómo opera este fármaco? El GIST suele estar provocado por mutaciones en el gen *homólogo del oncogén del virus del sarcoma felino Hardy-Zuckerman 4 kit-v*. Este trabalenguas, denominado *KIT* para abreviar, codifica la proteína KIT; lo mismo que CDK4, se trata de una quinasa, pero añade grupos fosfato sólo a la tirosina (uno de los 20 aminoácidos que componen las proteínas humanas).

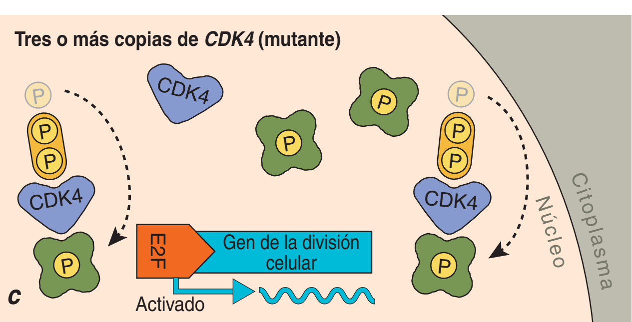
Las tirosina-quinasas tienden a instalarse en la membrana externa de la célula. Allí reciben señales del entorno más próximo y las transmiten al núcleo (mediante una cadena en la que participan otros mensajeros); así ayudan a determinar qué genes se activan o inactivan. Las tirosina-quinasas hiperactivas provocan tumores de muy diversos tipos.

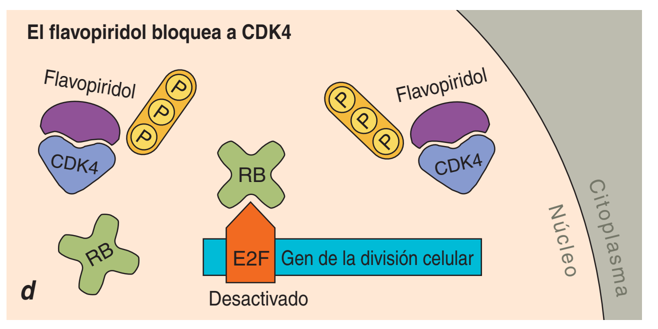
Aunque la proteína KIT aparece también en el cáncer microcítico de pulmón, el seminoma testicular y otros tipos de cáncer, sólo en el GIST hallamos mutaciones del gen que provocan una actividad descontrolada. En 2001, David A. Tuveson, entonces en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, demostró que el imanitib se interpone en la acción de la KIT normal y la mutante; inhibe el crecimiento de células de GIST en cultivo portadoras de esta última. Sus observaciones contribuyeron a que la Dirección Federal de Fármacos y Alimentos de los EE.UU. (FDA) acelerase la aprobación del imanitib para el tratamiento de los tumores de GIST en el caso de que, debido a un avanzado estado de metástasis, el tratamiento quirúrgico resulte inviable. El permiso se otorgó apenas 10 meses después de la publicación del caso. (Por regla general, los fármacos experimentales se aprueban primero para su uso en pacientes que han agotado las demás opciones.)

Para comprender el éxito del imanitib, importa recordar que antes de su advenimiento carecíamos de tratamientos eficaces contra el GIST. La mayoría de los tumores incluidos oponen una tenaz resistencia a la quimioterapia y la radioterapia; la única opción paliativa consistía en la realización de múltiples intervenciones quirúrgicas. En la actualidad, más del 80 por ciento de los pacientes se beneficia de la acción combinada de la cirugía y del imanitib. Por desgracia, en algunos casos esta mejora constituye sólo una demora. Los tumores varían en constitución génica; ello explicaría que algunos pacientes









5. DETERMINADOS LIPOSARCOMAS (cánceres de los adipocitos) están relacionados con una copia extra del brazo largo del cromosoma 12. Uno de los genes de esta región es *CDK4*, que codifica una proteína que regula, mediante la adición de grupos fosfato, uno de los interruptores principales de la división celular: el RB (*a*). En condiciones normales, las formas activa e inactiva de RB se encuentran en equilibrio; ello permite que algunas moléculas se agreguen a la proteína de unión al ADN E2F; con ello persisten inactivos los genes que controlan la división celular (*b*). Un exceso de CDK4 altera este equilibrio, pues evita que las moléculas de RB mantengan silentes a los genes cruciales (*c*). El fármaco flavopiridol trata de recomponer el orden mediante la inhibición de CDK4 (*d*).

BARBARA AULICINO/*American Scientist*

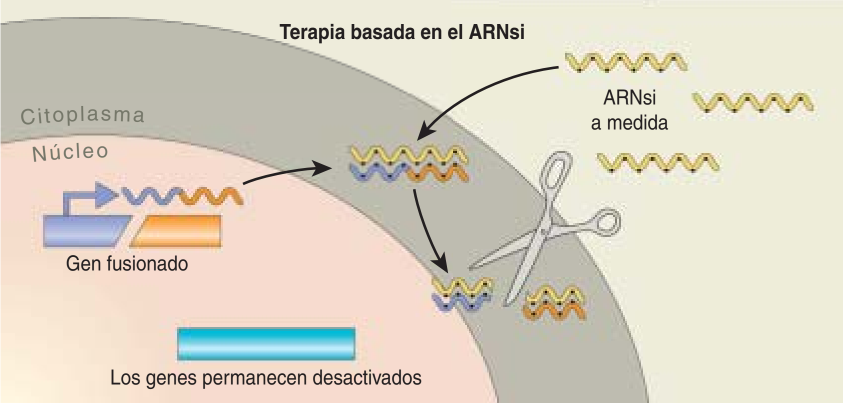
experimenten una leve mejoría mientras que en otros no hay respuesta alguna. A menudo, este último grupo es portador de tumores con escasa, si alguna, cantidad de proteína KIT, una variante que se encuentra también en pacientes que inicialmente responden bien al medicamento, pero empeoran a medida que las células expuestas van muriendo y las que quedan empiezan a generar nuevos tumores resistentes al imanitib.

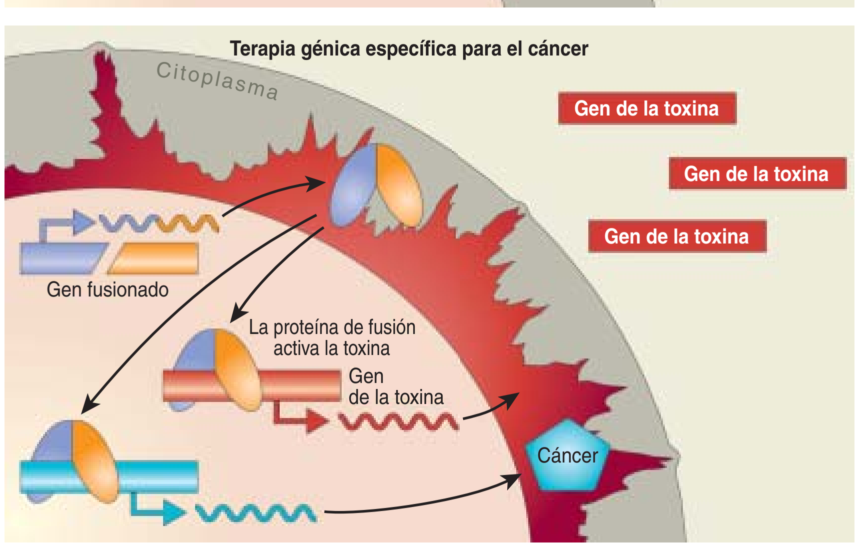
Más allá del sarcoma

El éxito del imanitib ha derivado en la investigación de un número creciente de sustancias que se interponen en el desarrollo de cánceres más frecuentes (y que no son sarcomas) como los de pulmón, colon, mama o próstata. Entre los fármacos aprobados se encuentran el gefitinib (Iressa) y el erlotinib (Tarceva), que tratan el cáncer de pulmón no microcítico (CPNM) mediante la inhibición del "receptor del factor de crecimiento epidérmico" (RFCE), una tirosinaquinasa. Esta proteína, hiperactiva en muchos tumores sólidos, va asociada a un mal pronóstico.

En EE.UU. y en Japón, los ensayos clínicos preliminares del gefinitib demostraron que casi la mitad de los pacientes mejoraban mientras tomaban el medicamento, un resultado notable, si tenemos en cuenta que sus tumores habían resistido la quimioterapia. Sin embargo, otros estudios demostraron que la inclusión del gefinitib en las terapias al uso no proporcionaba ningún beneficio añadido. No obstante, la FDA aprobó la utilización del gefinitib para el tratamiento de pacientes con CPNM avanzado cuyo estado había empeorado, tras haberse sometido al tratamiento estándar.

El erlotinib opera también mediante la inhibición del RFCE. En los ensayos clínicos, los oncólogos observaron un éxito moderado en el tra-





6. MUCHAS DE LAS TRANSLOCACIONES que dan lugar al cáncer implican la fusión de dos genes, de tal forma que codifican una única proteína. Se cree que estas "proteínas de fusión" provocan diversos tipos de cáncer, entre los que se incluyen varios sarcomas, al unirse al ADN y alterar la expresión génica normal (*arriba*). Sin embargo, al ser exclusivas de las células cancerosas, estas proteínas ofrecen una vía de ataque al tumor sin dañar el tejido sano. En una terapia experimental, se creó un ARN interferente pequeño (ARNsi) que contenía una secuencia complementaria al ARN mensajero de la proteína de fusión. Cuando las dos hebras de ARN se ensamblaron, la célula percibió al ARN de doble hebra como un virus y lo destruyó (*centro*). Otra terapia potencialmente específica contra los tumores saca provecho de las propiedades anormales de la proteína de fusión: se basa en añadir un fragmento de ADN obtenido por ingeniería genética, que codifica una toxina. El gen de la toxina se activa sólo en presencia de la proteína anormal (*abajo*). Así, las células cancerosas (que contienen la proteína de fusión) fabrican la toxina y mueren, mientras que las normales (que carecen de la proteína de fusión) no activan la toxina y, por tanto, sobreviven.

BARBARA AULICINO/*American Scientist*

7. EL TUMOR DE LA ESTROMA GASTROINTESTINAL (GIST) corresponde a un sarcoma agresivo. Resistente a la quimioterapia y a la radioterapia, sólo admite tratamiento por vía quirúrgica. Para los casos avanzados, no existen terapias. Sin embargo, hace unos cinco años, una mujer con un GIST extendido e inoperable se sometió a un tratamiento experimental basado en la semejanza molecular de su tumor con otro tipo de cáncer. Un barrido de tomografía de emisión de positrones (que mide la actividad metabólica con un trazador radiactivo) tomado antes de empezar el tratamiento muestra el cerebro, un riñón hinchado (debido a la enfermedad) y multitud de tumores abdominales (*izquierda*). A las cuatro semanas de recibir el tratamiento con STI571 (ahora imanitib), la demanda anormal del trazador en el abdomen cesó, una señal de que el cáncer había dejado de proliferar a un ritmo acelerado.





CORTESIA DE HEIKKE JOENSUU, DPTO. DE ONCOLOGIA DEL HOSPITAL CLINICO DE LA UNIVERSIDAD DE HELSINKI/*American Scientist*

tamiento del CPNM y del carcinoma broncoalveolar, otro tipo de cáncer de pulmón. Como era de esperar, los individuos que mejor respondieron al erlotinib eran los que portaban mutaciones en su RFCE. En noviembre de 2004, tras una revisión de urgencia, la FDA aprobó el erlotinib para el tratamiento de pacientes con cáncer de pulmón no microcítico avanzado que no mejoraban con la quimioterapia estándar. Dado que muchos de los cánceres habituales presentan proteínas RFCE, resulta lógico ensayar todos los inhibidores de esta proteína disponibles para determinar cuáles son los más eficaces en cada tumor y constitución genética. Hay en marcha estudios de ese tenor; en pocos años deberían contribuir a mejorar el tratamiento.

En el curso de los últimos diez años se han realizado notables descubrimientos sobre los mecanismos moleculares que provocan sarcomas y otros tipos de cáncer; ahora se empieza a ver la recompensa en forma de tratamientos dirigidos hacia los genes o proteínas de las células tumorales. Cierto es que queda todavía mucho que aprender acerca de los sarcomas provocados por translocaciones específicas, sin olvidar la gran mayoría de cánceres que no portan ninguna aberración génica conocida.

Abrigamos la esperanza de que el conocimiento obtenido a partir del estudio de los sarcomas mejor conocidos resulte aplicable a las variantes todavía sin caracterizar y a los tumores sólidos en general, como se ha demostrado con los recientes avances en las terapias contra el cáncer de pulmón. A buen seguro, dentro de unos pocos años el análisis sistemático de estos extraordinarios tumores redundará en beneficio de los pacientes.

Los autores

Igor Matushansky investiga en el Centro Memorial Sloan-Kettering de Oncología en Nueva York, en el laboratorio del español Carlos Cordón Cardó. Su trabajo se centra en la relación entre la diferenciación celular y la formación de tumores, y la aplicación de este conocimiento al tratamiento de los sarcomas. **Robert G. Maki,** profesor en la facultad Weil de medicina de la Universidad Cornell, codirige el Programa de Sarcoma en Adultos Memorial Sloan-Kettering. Estudia la aplicación de proteínas de choque térmico como vacunas tumorales y el tratamiento clínico de los sarcomas.

Bibliografía complementaria

EFFECT OF THE TYROSINE KINASE INHIBITOR STI571 IN A PATIENT WITH A METASTATIC GASTROINTESTINAL STROMAL TUMOR. H. Joensuu, P. J. Roberts, M. Sarlomo-Rikala, L. C. Andersson, P. Tervahartiala, D. Tuveson, S. L. Silberman, R, Capdeville, S. Dimitrijevic, B. Druker y G. D. Demetri en *New England Journal of Medicine*, vol. 344, págs. 1052-1056; 2001.

TARGETING OF EWS/FL1-1 BY RNA INTERFERENCE ATTENUATES THE TUMOR PHENOTYPE OF EWING'S SARCOMA CELLS IN VITRO. H. A. Chansky, F. Barahmand-Pour, Q. Mei, W. Khan-Farooqi, A. Zielinska-Kwiatkowska, M. Blackburn, K. Chansky, E. U. Conrad III, J. D. Bruckner, T. K. Greenlee y L. Yang en *Journal of Orthopaedic Research*, vol. 22, págs. 910-917; 2004.

MECHANISMS OF SARCOMAGENESIS. I. Matushansky y R. G. Maki en *Hematology/Oncology Clinics of North America*, vol. 19, págs. 427-449; 2005.

SARCOMAS IN ADOLESCENTS AND YOUNG ADULTS. K. H. Albritton en *Hematology/Oncology Clinics of North America*, vol. 19, págs. 527-546; 2005.

El motor



1. EL MANTO SE EXTIENDE BAJO LA CORTEZA TERRESTRE hasta una profundidad de 2900 kilómetros. El núcleo, que es fluido, está compuesto en casi un 80 por ciento por hierro líquido. A partir de los 5200 kilómetros de profundidad encontramos una "pepita" sólida, el núcleo interno o nucléolo. Los movimientos que se producen en el seno del núcleo líquido (*simbolizados en el dibujo mediante cilindros*) constituyen el motor de la dínamo terrestre, generadora del campo magnético. La estructura del campo (*simbolizado por líneas azules*) sufre, en la superficie del núcleo, mayores perturbaciones que en las cercanías de la corteza. Además, en la superficie terrestre el eje de este campo magnético no coincide con el eje de rotación terrestre, como sí ocurría en la superficie del núcleo.

de la dínamo terrestre

Para revelar los secretos del campo magnético de la Tierra, se intenta reproducir con simulaciones numéricas y experimentos sobre modelos de tamaño limitado los fenómenos dinámicos del núcleo terrestre

D. Jault, D. Brito, P. Cardin, y H.-C. Nataf

Los chinos, en el siglo II, utilizaban la magnetita —un óxido de hierro imanado de forma natural— con fines adivinatorios. Una cuchara de piedra imán, representación de la constelación de la Osa Mayor, situada sobre un ara ritual, determinaba el equilibrio del ying y el yang, las fuerzas enfrentadas en el universo. Después, la brújula se convirtió en algo más prosaico, en un instrumento de orientación, pues una aguja imantada que pueda girar libremente apunta, aproximadamente, en dirección norte.

Sabemos hoy que la brújula tiende a alinearse con las líneas de fuerza del campo magnético de la Tierra. Este último se parece mucho al que presentaría una enorme barra imantada emplazada en el centro del globo. El campo magnético es dipolar: las líneas de fuerza abandonan la superficie por el hemisferio sur, siguen hacia el norte a lo largo de los meridianos y vuelven a sumergirse hacia el interior del planeta en el hemisferio norte (*véase la figura 1*). Los polos magnéticos se encuentran a una distancia de una decena de grados de los polos geográficos.

Amén de ser una ayuda para la navegación, el campo magnético terrestre protege a los organismos vivos de las partículas energéticas, cósmicas o solares, que bombardean la Tierra sin cesar. Este escudo no tiene ni una estructura ni una intensidad constantes. Los polos magnéticos norte y sur se han trocado los papeles cientos de veces desde la formación de la Tierra. Por otra parte, las observaciones astronómicas han hecho ver que los campos magnéticos divergen de un planeta a otro del sistema solar. Por ello, resulta de la mayor importancia científica comprender de qué manera engendra un planeta —la Tierra, por ejemplo— un campo magnético.

Los geofísicos opinan que el magnetismo de la Tierra es consecuencia de los movimientos que animan su núcleo de metal en estado líquido, compuesto de hierro en casi un 80 por ciento. Ahora bien, en ciertas geometrías, los flujos y desplazamientos de líquidos conductores —caso del hierro líquido— pueden engendrar corrientes eléctricas, las cuales, a su vez, crean campos magnéticos, que intensifican las corrientes que les hicieron nacer, y así sucesivamente. Es el llamado efecto dínamo, en el que los campos magnéticos y las corrientes eléctricas se alimentan recíprocamente a partir del movimiento del fluido.

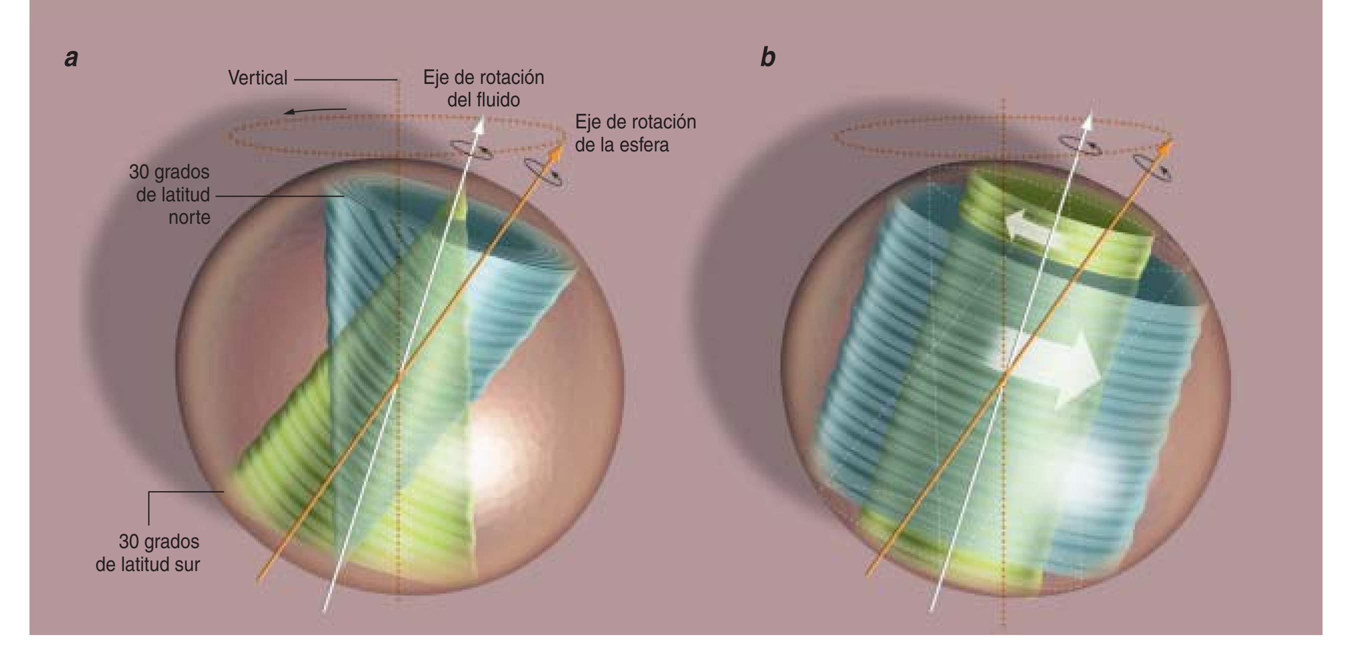
Sin embargo, si vamos más allá de su principio, el funcionamiento de la dínamo terrestre continúa siendo bastante misterioso. ¿A qué se debe que el campo magnético cambie en ocasiones de orientación y de sentido? ¿Qué fenómenos desencadenaron el efecto dínamo? Los geofísicos exploran dos motores de los movimientos internos en el núcleo terrestre. Están, por una parte, los movimientos del eje de rotación de la Tierra; por otra, la diferencia de temperaturas entre el centro de la Tierra y su superficie. Como no disponemos de una sonda que pueda calar hasta el núcleo para efectuar medidas en él, es preciso conformarse con simulaciones numéricas y con experimentos de laboratorio realizados sobre modelos de la Tierra a escala restringida.

Examinaremos en primer lugar la forma en que los movimientos del eje de la Tierra engendran ligaduras mecánicas capaces de desencadenar un efecto dínamo. Describiremos a continuación experimentos que permiten imaginar los movimientos de que está animado el corazón líquido de la Tierra. Una combinación de modelizaciones numéricas y experimentales nos permiten entrever de qué forma nace un campo magnético.

La Tierra gira sobre sí misma en un día. A este movimiento de rotación se suma un movimiento de precesión de su eje de rotación: va girando alrededor de una recta imaginaria perpendicular al plano de la eclíptica (el plano en que los planetas giran alrededor del Sol) y efectúa una vuelta completa cada 25.800 años. ¿De qué modo reacciona el núcleo de hierro líquido a las ligaduras mecánicas asociadas a estos movimientos? ¿Qué papel desempeña esta reacción en la generación del campo magnético terrestre?

Ya en 1910, el matemático Henri Poincaré estudió el movimiento de un núcleo líquido encerrado en una cápsula sólida (el manto), ligeramente achatada por los polos y animada de un doble movimiento de rotación y de precesión. En el caso aproximativo de un fluido perfecto, es decir, de viscosidad nula, Poincaré calculó que el núcleo líquido gira en bloque en torno a un eje

DELPHINE BAILLY



2. UN RECIPIENTE de forma elipsoidal, lleno de agua, gira en torno a un eje (*en color naranja*) que está sometido, a su vez, a un movimiento de precesión (la extremidad del eje de rotación describe el círculo naranja centrado sobre la vertical). Aparecen ondas "inerciales" (*a*), a 30 grados de latitud norte y sur (con respecto al eje de rotación del fluido). Las ondas inerciales se propagan enrollándose sobre un cono de eje oblicuo con respecto al de rotación del elipsoide. Las ondas inerciales crean flujos fluidos

intermedio entre el eje de rotación instantáneo del manto y el eje de precesión. Friedrich Busse, físico alemán, demostró en 1968 que ese movimiento en bloque predicho persiste incluso cuando se toma en consideración la viscosidad del núcleo. Concretamente, la dinámica del núcleo se determina estudiando la acción de varios pares de fuerzas: un par debido al movimiento de precesión, que tiende a llevar al eje de rotación del núcleo sobre la perpendicular al plano de la eclíptica; un par de presión ejercido por la envoltura sólida sobre el núcleo subyacente, debido al carácter elíptico de la frontera que separa el manto del núcleo (esta elipticidad, medida por el cociente de la diferencia de longitud de los dos ejes de la elipse dividida por la longitud del eje mayor, es igual a 1/400); y un par viscoso, ejercido asimismo por el manto sobre el núcleo y debido a que uno y otro no giran con exactamente la misma velocidad angular. Estos dos últimos pares tienden a llevar el eje de rotación del núcleo sobre el correspondiente al manto.

La reacción del sistema puede ser muy violenta para ciertos valores de las ligaduras exteriores. Por ejemplo, cuando la relación entre la velocidad de precesión y la velocidad de rotación es equiparable a la elipticidad, el eje de rotación del núcleo líquido puede quedar desviado hasta 90 grados del eje de rotación del manto (no puede invertir el sentido de rotación del núcleo). Este caso no se da en nuestros días, pero dos geofísicos franceses, Marianne Greff-Lefftz, del Instituto de Física del Globo de París, e Hilaire Legros, del Instituto de Física del Globo de Estrasburgo, demostraron en 1999 que sí pudo haberse dado hace varios cientos de millones de años, cuando la Tierra giraba más velozmente.

Aparte de esa "excursión" del eje de rotación, en un fluido en rotación aparecen otros flujos complejos, que no es posible determinar mediante un estudio exclusivamente matemático. Desde 1998 venimos realizando una serie de experimentos a escala reducida, destinados a estudiar los movimientos posibles en el seno de un núcleo fluido. Hemos utilizado un recipiente lleno de agua, de 25 centímetros de diámetro, ligeramente elipsoidal, animado de un doble movimiento, una rotación rápida y una precesión. Con el fin de respetar la escala de los movimientos terrestres, el elipsoide gira a una velocidad que puede llegar a los varios centenares de vueltas por minuto, mientras que el movimiento de precesión tiene un período de varios minutos.

Ondas inerciales y cilindros giratorios

Pretendíamos, con mayor precisión, observar las ondas "inerciales", un fenómeno estudiado por nuestro equipo después de que Rainer Hollerbach y Richard Kerswell, de las universidades de Newcastle y Glasgow, hubiesen revelado su existencia en los años noventa. Las simulaciones informáticas habían hecho ver que en el caso de un movimiento de precesión, la fricción del núcleo contra el manto provoca una cizalladura —asociada al desplazamiento de masas de fluido que rozan unas contra otras— que se propaga a través del líquido. Nacen estas ondas a 30 grados de latitud (norte y sur) con respecto al eje de rotación del fluido, en la frontera entre el manto y el núcleo (en el experimento, en la frontera pared-líquido), y se propagan desde allí formando un tirabuzón a lo largo de una superficie cónica cuyo vértice se encuentra en el polo opuesto al hemisferio donde son generadas (*véase la figura 2*).

Hemos logrado observar estas ondas inerciales en el laboratorio. Para conseguir tal proeza, medimos el perfil de las velocidades de desplazamiento del fluido mediante un velocímetro Doppler ultrasonoro que recogía el eco de diminutas partículas introducidas en el líquido. Las duraciones de ida y vuelta de la onda ultrasonora desde el emisor hasta el receptor proporcionan las posiciones de cada partícula, mientras que la diferencia de las frecuencias emitida y recibida da su velocidad y el sentido de su desplazamiento. Hemos observado asimismo las grandes excursiones del eje de rotación del fluido.





cilíndricos coaxiales, que giran en sentidos opuestos (*b*). La fuerte cizalladura asociada a una tal circulación en el seno del núcleo terrestre podría ser uno de los elementos responsables del campo magnético de la Tierra, ya que crea corrientes eléctricas.

POUR LA SCIENCE

Nuestro experimento ha revelado otros movimientos: los desplazamientos fluidos adoptan la forma de dos cilindros concéntricos, cuyo eje es el eje de rotación, que giran en sentidos opuestos (*véase la figura 2*). Los extremos de estos cilindros se encuentran situados, aproximadamente, en el lugar de nacimiento de las ondas inerciales. El efecto de cizalladura, intenso en la fuente de las ondas inerciales, acelera esos desplazamientos cilíndricos de fluido. Las velocidades de los desplazamientos en el seno de la Tierra se evalúan por extrapolación de los resultados de las simulaciones numérica y experimental.

La determinación de los movimientos de materia en el seno de un elipsoide de revolución no es sino una primera etapa en la comprensión del motor de la dínamo terrestre. Las ecuaciones de la magnetohidrodinámica expresan la forma en que la energía mecánica transportada por los diferentes movimientos del fluido se transforma en energía eléctrica (es decir, en desplazamientos de electrones, que es preciso diferenciar de los movimientos de materia.) En razón de la complejidad de los cálculos, no se dispone de un criterio general que indique si una determinada dinámica va a crear, o no, un campo magnético estable. No obstante, hemos determinado que, aunque las ondas inerciales no engendraran corrientes eléctricas, los flujos estacionarios dispuestos en cilindros concéntricos que giran en sentidos contrarios sí podrían hacerlo.

Para que, en estas condiciones, nazca un campo magnético estable, es necesario que las corrientes "ceben" un pequeño campo magnético, el cual, a su vez, reforzará la corriente, que intensificará el campo magnético, y así sucesivamente hasta la instauración de un régimen estacionario. El problema consiste ahora en demostrar que con este estado estable del campo, los movimientos fluidos que dieron ser a toda la cascada de fenómenos son perdurables. La causa primordial de un mecanismo tal residiría en la cizalladura entre cilindros coaxiales. Uno de los pioneros de tales estudios fue Wilhelm Malkus, de la Universidad de Los Angeles, en los años setenta. Malkus hizo girar varios litros de sodio líquido, a los que impartió un movimiento de precesión; esperaba que apareciese un campo magnético. No logró observar el efecto dínamo, pero sí obtuvo resultados… que nadie, hasta ahora, ha sabido interpretar.

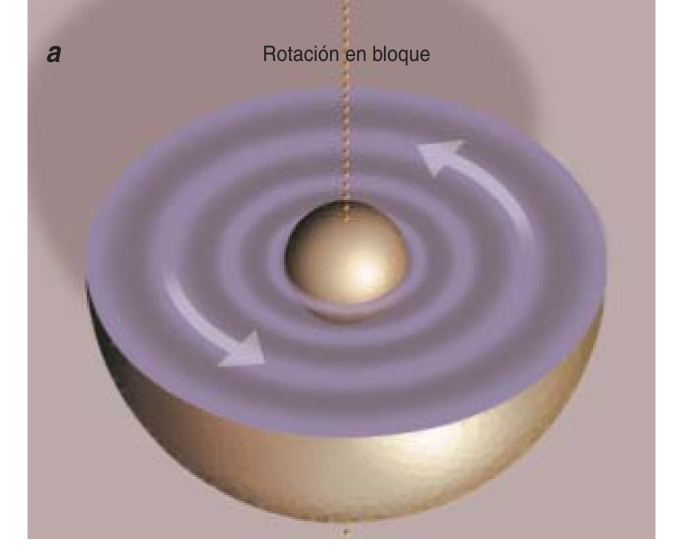
Prosiguiendo con nuestros experimentos, hemos determinado que, cuando aumenta la velocidad de precesión, se deforman los cilindros concéntricos. Aparecen turbulencias entre los cilindros y se engendran nuevas inestabilidades. La dinámica del núcleo entra entonces en un estado turbulento. Seguimos con nuestras investigaciones al objeto de cuantificar estos fenómenos; no es imposible que desempeñen cierto papel en la instauración de la dínamo terrestre.

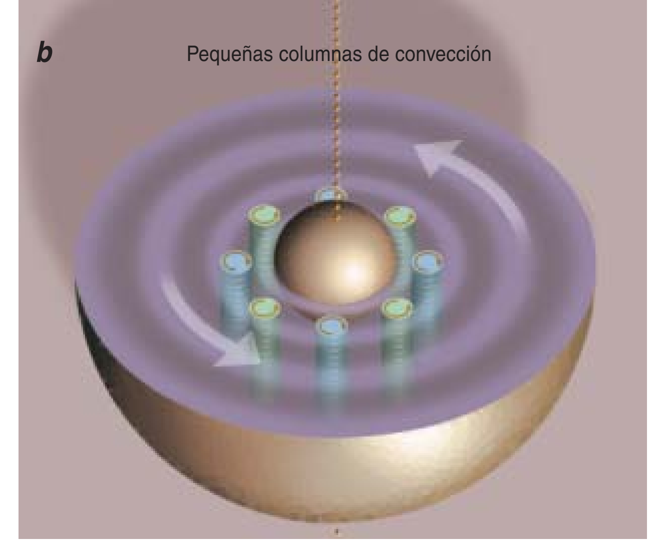
La convección térmica

Existe, además de la precesión, otro candidato serio a motor de la dínamo terrestre. No pocos geofísicos opinan que su origen debe buscarse en los movimientos de convección térmica que agitan el corazón del planeta. Por estar el interior de la Tierra más caliente que la superficie, su calor se libera poco a poco, desde el interior hacia la superficie. Si la diferencia de temperatura entre el núcleo y el manto es pequeña, el calor se evacua por simple conducción, sin flujo de materia. Si la diferencia de temperatura es grande, el metal líquido caliente, menos denso que el centro, asciende: el calor se evacua por convección térmica.

Para estudiar los movimientos de convección térmica cabe, en un principio, despreciar la influencia de los fenómenos electromagnéticos. Con tal propósito se puede utilizar en los experimentos un líquido que sea mal conductor de la electricidad; el agua, por ejemplo. Tras los trabajos de F. Busse, los geofísicos empezaron por estudiar el umbral de aparición de movimientos convectivos. Como hemos mencionado ya, el estado más natural de un fluido encerrado en una esfera que gira sobre sí misma es la rotación en bloque con su envoltura sólida. Si la diferencia de temperatura entre el corazón del núcleo y su superficie es pequeña, no ocurre nada digno de mención. Sin embargo, cuando la cantidad de calor que se ha de evacuar aumenta, las simulaciones numéricas muestran la aparición de una inestabilidad. Esta última modifica la dinámica del sistema y los movimientos convectivos del fluido se organizan en finas columnas, paralelas al eje de rotación y distribuidas en anillos alrededor de dicho eje. El flujo presenta entonces una alternancia de torbellinos (ciclones), en los que el fluido circula en el sentido de rotación de la esfera, y de anticiclones, con una circulación en sentido opuesto (*véase la figura 3*).

El diámetro de los torbellinos depende de la viscosidad del fluido. Cuanto menor sea ésta, tanto más disminuye el diámetro de los torbellinos y más difícil resulta de alcanzar la temperatura umbral de la convección. La viscosidad se opone a los movimientos, y lo hace con una eficacia inversamente proporcional al diámetro de las columnas. El sistema tiende entonces hacia un estado donde se conjugan la cantidad de calor que se ha de evacuar, la viscosidad que se opone a la aparición de columnas fluyentes que sean demasiado pequeñas y el que las columnas pequeñas se formen con mayor







3. LA CONVECCION TERMICA DEL NUCLEO puede reproducirse en el laboratorio (*sobre estas líneas*). Se establece una diferencia de temperaturas entre la superficie y el centro de una esfera, y se le imparte un movimiento de rotación. Si la diferencia de temperaturas entre la superficie y el centro es pequeña, la evacuación del calor se produce solamente por conducción; el fluido gira solidariamente con la cápsula. Al aumentar la diferencia de temperatura aparecen otros movimientos en el seno del líquido; el calor se evacua también por convección. De acuerdo con las simulaciones numéricas y los experimentos, a baja temperatura no se observan columnas de convección (*a*). A partir de una cierta diferencia de temperatura, se forman columnas de convección (*b*). Una de cada dos columnas tiene un sentido de giro coherente con el de rotación del núcleo; las demás giran en sentido contrario. Cuando se aumenta todavía más la diferencia de temperatura (*c*), las columnas se agrandan y en las cercanías del núcleo interno se selecciona un solo sentido de rotación. Tras superar un nuevo valor umbral, las columnas se organizan en dos anillos concéntricos.

facilidad que las grandes. En el interior de la Tierra, habida cuenta de la escasa viscosidad del hierro líquido (del mismo orden que la viscosidad del agua), son de esperar columnas cuya base mida varios kilómetros de diámetro.

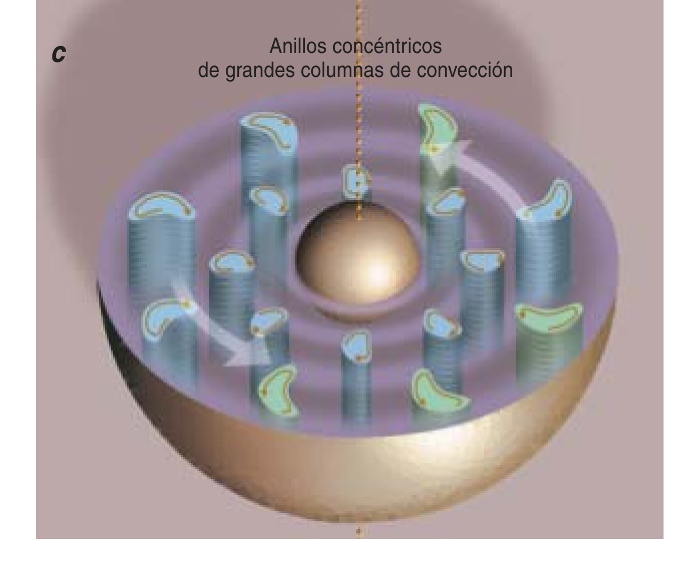
En nuestras modelizaciones numéricas de la dínamo terrestre hemos considerado un líquido de viscosidad mayor que la del núcleo terrestre. Con una viscosidad pequeña el número de columnas convectivas de la simulación del núcleo hubiera sido demasiado grande, habida cuenta de la capacidad de cálculo de los ordenadores actuales. Por consiguiente, las columnas convectivas de nuestros modelos, si bien reproducen cualitativamente la dinámica del núcleo, son mucho mayores que las que presuntamente girarían en el interior de la Tierra, de no existir campo magnético (*véase la figura 3*).

La etapa siguiente de las simulaciones numéricas consiste en tener en cuenta las propiedades eléctricas del líquido. Deseamos saber si los movimientos del fluido van acompañados de corrientes eléctricas, y si estas últimas son susceptibles de engendrar un efecto dínamo. En el caso de campos magnéticos intensos es de esperar también que las fuerzas magnéticas modifiquen los movimientos del fluido.

Para que se genere un campo magnético potencial es necesario aumentar la conductividad del "fluido numérico". A pesar de las diferencias con la situación real, las simulaciones numéricas hacen aparecer un campo magnético que reproduce en parte la geometría del campo terrestre: un dipolo magnético alineado con el eje de rotación, como las columnas convectivas. Está por reproducir el mismo fenómeno con una viscosidad y una conductividad eléctrica cercanas a los valores reales. Aunque ello no es todavía posible por medios numéricos, las simulaciones se completan mediante experimentos de laboratorio.

Emprendimos en 1998 un estudio en el que se hace girar rápidamente (sin precesión) una esfera de 22 centímetros de diámetro rellena de agua o de galio (un metal líquido de buena conductividad eléctrica). Para imitar la fuerza de gravitación existente en el núcleo terrestre (que no puede tener equivalencia en el laboratorio), hemos sometido al sistema a una fuerte aceleración centrífuga, inducida por una rotación rápida. Por estar la fuerza centrífuga dirigida desde el eje de rotación hacia el exterior, contrariamente a la gravedad, que se dirige hacia el centro de la esfera, hemos invertido el sentido del gradiente térmico, imponiendo la tempera-

POUR LA SCIENCE



tura más elevada en la superficie de la esfera (mediante un sistema de hilos calefactores) y la más baja en su centro (mediante un sistema de refrigeración por agua, que desempeña también el papel de nucléolo, o núcleo interno). Así pues, nuestro sistema reproduce las condiciones geofísicas “en negativo” (si bien con una fuerza de “gravedad “ que tiene “simetría cilíndrica” y no esférica). Esta doble inversión no repercute en la geometría de los flujos ni en la estructura de un eventual campo magnético.

La convección térmica en el laboratorio

En el caso del agua, hemos medido la convección térmica mezclando con el agua polen muy hidrófilo; los movimientos del polen se registran, como anteriormente, por velocimetría Doppler. Los experimentos con galio líquido han demostrado ser más delicados, por la dificultad de encontrar partículas que se mantengan bien en suspensión en este fluido. Los experimentos permiten la exploración de una gama de parámetros complementaria de la consentida por las simulaciones numéricas. Además, han sido importantes en la puesta a punto de simulaciones numéricas, a un tiempo rápidas y fiables.

¿Qué hemos constatado? A medida que aumenta la diferencia de temperatura impuesta al sistema, los movimientos se van haciendo más turbulentos y las columnas de convección se agrandan, a la vez que se separan más entre sí. Las columnas acaban organizándose en dos anillos concéntricos en torno al nucléolo, lo que recuerda la estructura en cilindros concéntricos observada en los experimentos con precesión. El anillo interior está constituido por columnas convectivas que giran en sentido inverso al del núcleo; en cambio, los sentidos de circulación del anillo exterior son aleatorios. Esta configuración implica grandes cizalladuras en el fluido, que se producen en las dos series de columnas.

Estos movimientos de cilindros concéntricos se presentan, pues, como una característica general de los desplazamientos de fluido en el interior de una bola líquida en rotación rápida a partir del momento en que las ligaduras son importantes, se deban a un movimiento de precesión o a una diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la esfera. Los movimientos observados con el galio difieren sensiblemente de los correspondientes al agua en condiciones equivalentes: las columnas son mayores y, más pronunciada, la cizalladura de conjunto sobre el cilindro centrado en el eje de rotación que se apoya en el nucléolo. La explicación se basa en que el galio, un metal líquido, como la aleación de hierro del núcleo terrestre, es mejor conductor del calor que el agua.

Pero nuestros experimentos no han conseguido la aparición espontánea de campo magnético, ni siquiera con galio (los flujos no eran lo suficientemente rápidos). Para estudiar la influencia de un campo magnético sobre el desplazamiento convectivo hemos construido un experimento en el cual imponemos un campo magnético desde el exterior. Buscamos determinar si este campo puede deformar el desplazamiento de fluido y, así, cebar la dínamo; deseamos también saber si aumenta la cizalladura entre los cilindros. En caso afirmativo, cabría pensar que ese tipo de dinámica está operando en la dínamo terrestre.

Varios equipos efectúan simulaciones y experimentos similares a los aquí descritos. Se multiplican los proyectos experimentales y progresan los cálculos numéricos. Unos y otros comienzan a dar una idea bastante precisa de los movimientos que animan al núcleo fluido del planeta Tierra. Los desplazamientos que provocan, tanto bajo los efectos de la precesión como de la convección térmica, presentan cizalladuras elevadas, condición favorable a la creación de campos magnéticos. Así, las simulaciones numéricas de la convección térmica en el núcleo han demostrado que un sistema de columnas convectivas engendra un campo magnético similar al dipolo terrestre. No se ha conseguido todavía, en cambio, obtener un efecto dínamo en un experimento de laboratorio que reproduzca la geometría de la Tierra. Dos equipos independientes —de Riga, uno; de Karlsruhe, el otro— consiguieron en 2000 un efecto dínamo en laboratorio. La geometría de los dispositivos experimentales era muy distinta de la geometría esférica. No por ello resulta, sin embargo, menos estimulante para los geofísicos que se esfuerzan en desentrañar el misterio de la dínamo terrestre y saber por qué la brújula señala al norte.

Los autores

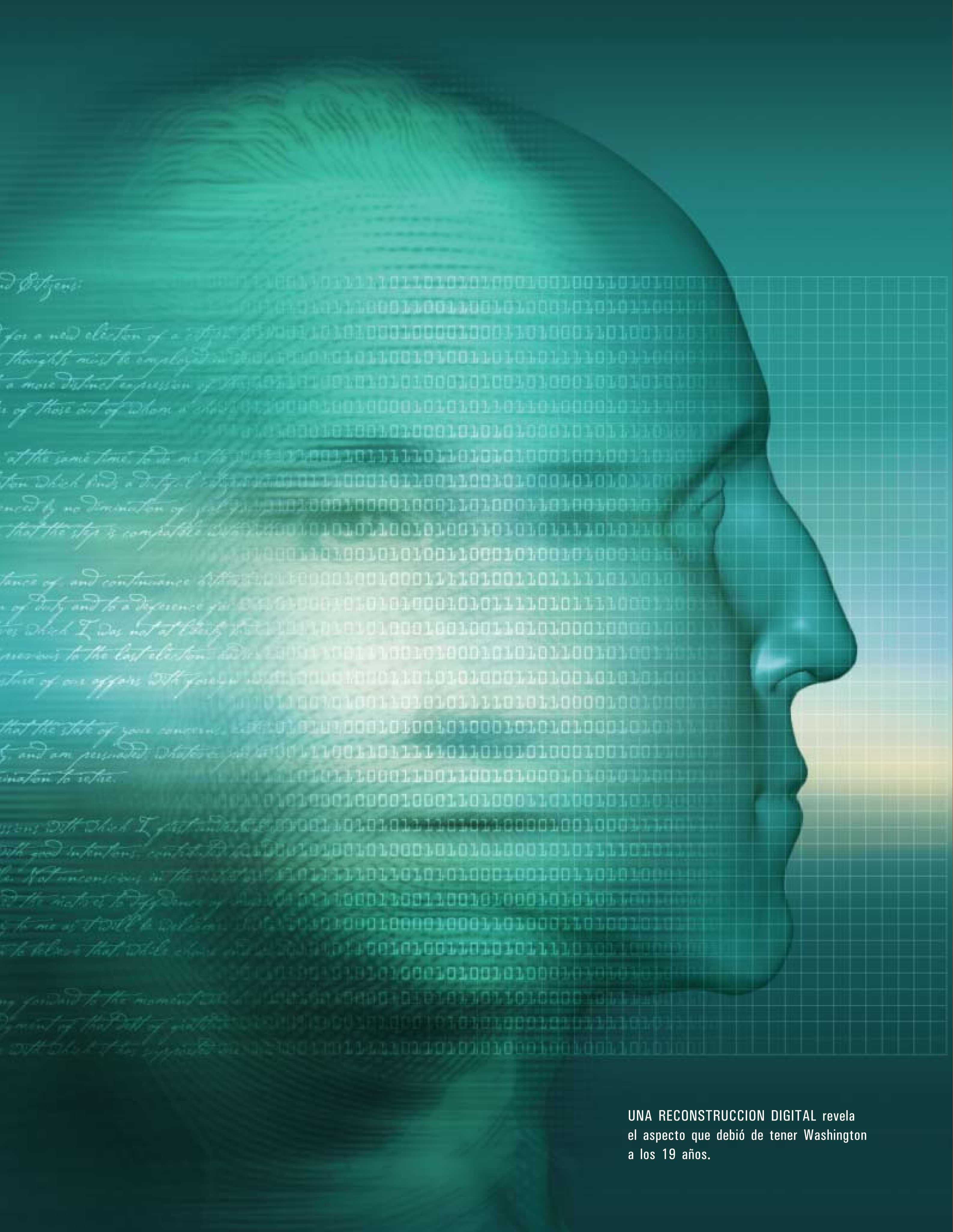
Dominique Jault, Daniel Brito, Philippe Cardin y Henri-Claude Nataf son, respectivamente, director de investigaciones, profesor ayudante, encargado de investigaciones y director de investigaciones. Trabajan en el Laboratorio de Geofísica Interna y Tecnofísica en Grenoble.

Bibliografía complementaria

LA PHYSIQUE DE LA TERRE. Dirigido por Henri-Claude Nataf y Joël Sommeria. Belin-CNRS éditions; París, 2000.

A SYSTEMATIC EXPERIMENTAL STUDY OF RAPIDLY ROTATING SPHERICAL CONVECTION IN WATER AND LIQUID GALLIUM. J. Aubert, D. Brito, H.-C. Nataf, y J.-P. Masson en *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 128, págs. 51-74; 2001.

EXPERIMENTAL EVIDENCE OF NON-LINEAR RESONANCE EFFECTS BETWEEN RETROGRADE PRECESSION AND THE TILT-OVER MODE WITHIN A SPHEROID. J. Noir, Ph. Cardin, D. Jault y J.-P. Masson en *Geophysical Journal International*, vol. 154, págs. 407-416; 2003.



UNA RECONSTRUCCION DIGITAL revela el aspecto que debió de tener Washington a los 19 años.

Reconstrucción de la figura de George Washington

Un antropólogo forense reconstruye el aspecto que tenía el primer presidente estadounidense cuando era joven

Jeffrey H. Schwartz

En contra de lo que suele explicarse en las escuelas estadounidenses, George Washington nunca taló un cerezo ni llevó dentadura postiza de madera. Pero éstas son sólo las menores de las sorpresas con las que me he encontrado en uno de mis últimos trabajos: la reconstrucción del aspecto del primer presidente de EE.UU. en su juventud, antes de que se realizaran los famosos retratos y estatua.

Este encargo me embarcó en una investigación que habría de revelar un Washington muy distinto del inaccesible hombre de estado, de mediana edad y labios finos que aparece en los billetes de dólar. Mi incursión en la historia estadounidense comenzó cuando James C. Rees, director de Mount Vernon, en el estado de Washington, me pidió que recreara la fisonomía del primer presidente, nacido en 1732 y fallecido en 1799, en tres momentos importantes de su vida. Rees necesitaba las figuras, a tamaño real, para un nuevo centro educativo de Mount Vernon, de próxima inauguración.

Se representaría el Washington de 19 años (en 1751), cuando empezaba su etapa de aventurero y topógrafo. También el de 45 años (en 1777), cuando él y sus tropas estuvieron acampados durante el atroz invierno de Valley Forge, esperando la oportunidad de atacar a los británicos, que habían ocupado la ciudad de Filadelfia. Estas dos figuras se complementarían con una tercera representación, el Washington de 57 años prestando juramento, el 30 de abril de 1789, como primer presidente de la Unión, cargo que eligió frente a la otra alternativa que se le había ofrecido: proclamarse rey.

A lo largo de mi carrera profesional, en el ámbito de la antropología física, he analizado huesos de homínidos primitivos y he reconstruido especímenes de nuestros antepasados. En el campo más ceñido de la antropología forense, mi servicio en la oficina del juez de instrucción del condado de Allegheny, en Pennsylvania, me ha permitido acumular una valiosa experiencia. Pero no me había ejercitado nunca en nada que me avalara para hacer frente al desafío de reconstruir el aspecto de un Washington joven. De entrada, una dificultad: no podría estudiar los restos óseos. No se desenterrarían. ¿Sin huesos? ¿Cómo es posible siquiera imaginarse una reconstrucción forense sin huesos? Pero el reto resulta sumamente sugestivo como para rechazarlo.

TOM DRAPER DESIGN

Las pistas

Para empezar a trabajar disponía de una estatua de mármol blanco de cuerpo entero, un busto y una máscara (un molde de la cara), todos realizados por el escultor francés Jean-Antoine Houdon, que retrató por vez primera a Washington durante una visita a Mount Vernon en 1785, cuando éste tenía 53 años. Contaba también con varios retratos ya de sus años de madurez y principios de su vejez, en su mayoría de los pintores Gilbert Stuart, Charles Wilson Peale y su hijo Rembrandt Peale, y John Trumbull. Varias dentaduras postizas y alguna indumentaria, pertenecientes también a la última etapa de su vida, se añadían a la lista de pruebas.

Necesitaba combinar y manejar todos estos datos. Pensé que si escaneara en tres dimensiones la máscara, el busto y la estatua de Houdon, podría compararlos y obtener así información más precisa de los detalles. Escanearía también las dentaduras; luego, las insertaría en la cabeza digitalizada para determinar la curvatura de las mandíbulas. Después estimaría cuánto hueso de los maxilares había perdido Washington para cuando llegó a los 53 años (sus maxilares no habrían cambiado mucho a los 57 años) y lo reemplazaría, retrotrayéndome en el tiempo y rejuveneciéndolo.

Tan pronto como me di cuenta de que necesitaba operar en el mundo digital tridimensional, pensé en PRISM, la Sociedad para la Investigación en Modelado Espacial (“Pastnership for Research in Spatial Modeling”), de la Universidad estatal de Arizona. Allí colaboraban escultores, antropólogos físicos, ingenieros e informáticos. Aunque había otros laboratorios especializados en imagen digital tridimensional, PRISM había ya trabajado con antropólogos físicos, lo que garantizaba que compartiéramos un lenguaje científico común. Le presenté el proyecto a Anshuman Razdan, director de PRISM. Aceptó el reto.

Empecé a trabajar con las representaciones de un Washington de 53 años. Elegí las de Houdon, un escultor destacado por la meticulosidad de su técnica. Según informes de la época, había usado calibradores para tomar las medidas del presidente de pies a cabeza. Desgraciadamente, el estudio de Houdon y todos sus apuntes se destruyeron durante la Revolución Francesa. Ello no obstante, numerosos expertos están convencidos de la exactitud de las medidas, del busto así como de la estatua. De hecho, el mismo Washington había pedido al escultor que no le representara mayor que el tamaño real, como era costumbre hacer con los prohombres de la patria. Para determinar la exactitud de las medidas, Razdan y sus colaboradores escanearon el busto y la máscara. La comparación de los datos digitales reveló que eran casi idénticos: diferían sólo en 0,3 milímetros, una cantidad insignificante. Se demostraba así que la estatua y el busto constituían representaciones precisas del rostro de Washington. Sin embargo, había algo que no me convencía de tan asombrosa coincidencia. Según documentos de Mount Vernon, Houdon había realizado el busto días antes que la máscara; por tanto, la diferencia entre ambos debería ser mayor, pues el busto se habría realizado a mano alzada. Aun así, los ojos, la nariz, la barbilla asimétrica ligeramente desviada, la posición de los lóbulos de las orejas que estaban a la vista y las arrugas de la frente eran idénticos en la máscara y en el busto. Después de meses de desconcierto, llegué al convencimiento de que Houdon no había realizado la cara del busto a mano alzada. Tras añadir los ojos a la máscara (debían cubrirse para tomar el molde de la cara) hizo un molde de la máscara y, a partir del mismo, creó la cara del busto con arcilla. En cuanto al resto de la cabeza, no me quedaba otra alternativa que creer que respondía a las calibraciones de Houdon.

Para averiguar en qué medida los retratos de Washington se ajustaban a la realidad y, por tanto, me iban a ser de utilidad, me entrevisté con Ellen G. Miles, conservadora de pintura y escultura de la Galería Smithsoniana nacional de Retratos. Me advirtió que debíamos dudar no sólo de las copias de los originales pintados por artistas para quienes Washington posaba, sino también de los propios originales. Fijémonos, por ejemplo, en el retrato de Stuart de fines de 1790, una de los escasos cuadros de tamaño real del siglo XVIII que se le hicieron a Washington. El rostro es evidentemente del presidente. (Stuart lo debió copiar de un retrato suyo que, ahora colgado en el Ateneo de Boston, es reflejo del que aparece en el billete de dólar.) Sin embargo, las manos corresponden, con toda probabilidad, a las de Stuart. Y para pintar el cuerpo, el autor se ayudó de tres modelos que posaron en sustitución de Washington.

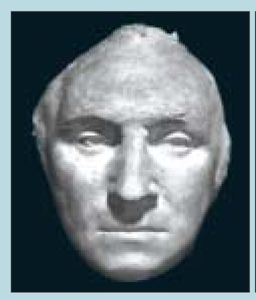
El retrato de Trumbull de 1792, en cambio, representaría el cuerpo de Washington desde el cuello para abajo con mayor fidelidad que desde el cuello para arriba. Sorprende también la comparación de los retratos que en 1795 pintaron simultáneamente Peale y su hijo Rembrandt, de 17 años, cuando Washington, que contaba ya con más de sesenta años, posó para los dos a la vez. Mientras el padre pintó a un Washington ligeramente regordete, de mirada compasiva y mejillas sonrosadas (es decir, pintó a su antiguo amigo y camarada), el hijo representaría a un anciano demacrado y con arrugas profundas. En breve, disponíamos de al menos cuatro visiones del Washington de 60 años, cada una distinta de las demás.

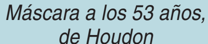
Si los retratos me confundían, las dentaduras postizas no se quedaban

Resumen/Reconstrucción forense

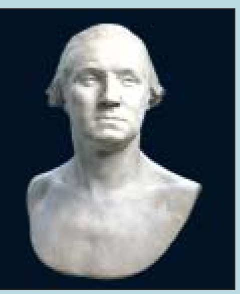
- En el marco de una exposición para un centro educativo en Mont Vernon, se encargó la reconstrucción forense de George Washington. Se trataba de construir figuras de tamaño natural del primer presidente estadounidense a la edad de 19, 45 y 57 años.
- Sin poder pensar en analizar los restos óseos, dada la prohibición taxativa de su remoción, se contaba sólo con la referencia de una estatua, retratos, una máscara, dentaduras postizas e indumentaria.
- Mediante un programa informático de análisis de imágenes tridimensionales se han combinado y tratado estos datos para llegar a las tres reproducciones de tamaño real.

LOS PRIMEROS PASOS DE LA RECONSTRUCCION





Máscara a los 53 años, de Houdon



Busto a los 53 años, de Houdon



Máscara escaneada



Busto escaneado

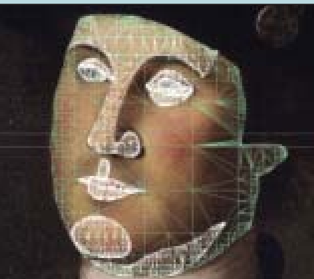


Comparación

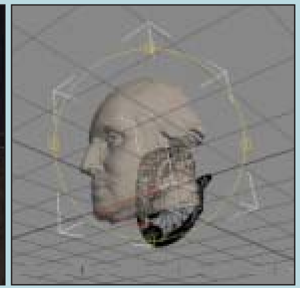
La reconstrucción partió de la máscara y el busto del escultor Jean-Antoine Houdon, realizados en 1785, cuando Washington tenía 53 años. Para determinar si el busto representaba el aspecto de Washington con suficiente fidelidad, se escanearon la máscara y el busto. Luego se compararon las imágenes tridimensionales obtenidas. Se detectó una diferencia irrelevante de 0,3 milímetros. El amarillo refleja las áreas de contraste. Las zonas cruciales (ojo, nariz y boca) pueden considerarse idénticas.



Retrato a los 40 años, de C. W. Peale



Retrato escaneado



Superposición digital del retrato sobre el busto



Comparación del retrato con el busto

Para la reconstrucción del Washington más joven se escaneó la pintura de Charles Wilson Peale de 1772, cuando el político tenía 40 años. Es el retrato más antiguo que existe. La comparación digital de este retrato con el busto reveló que la distancia entre la nariz y la barbilla era mayor en el retrato. Se dedujo que, si bien a los 53 años Washington ya había perdido la mayoría de sus piezas dentarias, a los 40 probablemente todavía le quedaban algunos dientes anteriores, lo cual marcaría una diferencia en la forma del rostro. Esta diferencia guió la retroconstrucción, desde el busto y la máscara, hasta los años de juventud.

PIERPONT MORGAN LIBRARY/ART RESOURCE, NY (*máscara*); MOUNT VERNON LADIES' ASSOCIATION (*busto*); WASHINGTON-CUSTIS-LEE COLLECTION, UNIVERSIDAD WASHINGTON Y LEE (*retrato de Peale*)

atrás. Caí enseguida en la cuenta de que, pese a la leyenda, Washington no llevaba dentadura postiza de madera. En el siglo XVIII, la placa donde se fijaban los dientes (humanos o animales) solía fabricarse con marfil, generalmente de colmillo de hipopótamo. Con el tiempo, el marfil se cuartea; aparecen finas líneas entre los prismas mineralizados que componen su superficie. Tras años de comer, beber y fumar, estas finas grietas se oscurecen más que los prismas de esmalte. Parece que alguien las confundió con las vetas de la madera; así nació la leyenda.

Lo que sí es cierto es que Washington ya había perdido la mayoría de sus dientes cuando Houdon visitó Mount Vernon. Contaba con poco más de veinte años cuando se sometió a la extracción de una primera pieza; para cuando había cumplido 53 apenas si le quedarían un par de dientes de la serie inferior. Desconocemos la causa de sus problemas dentales, pero podría haber sufrido una enfermedad periodontal progresiva, agravada por su autoproclamada adicción a las nueces, que partía con los dientes. Cuando perdemos un diente, el hueso en el que se sujetaban las raíces del mismo se resorbe y la altura de la mandíbula en esa zona se reduce. Si perdemos unas cuantas piezas, los maxilares superior e inferior (sobre todo el inferior) se alteran en forma y tamaño. Por consiguiente, para reconstruir el Washington de 19 y el de 45 años, debía determinar en qué condiciones se encontraban su mandíbula y cavidad bucal cuando tenía 53 años, para luego rehacer la mandíbula mediante la adición de diente y hueso.

Había que empezar por localizar alguna dentadura postiza que Washington hubiera utilizado durante esa época de su vida. Aunque había sido enterrado con su última dentadura postiza, pude analizar la parte inferior de una dentadura que había fabricado el dentista Joseph Greenwood en 1789, conservada ahora en la Academia de Medicina de Nueva York. Encontré también la parte inferior de una dentadura postiza que Greenwood fabricó en 1795, después de que Washington hubiera perdido su último diente. La pieza había estado en la Institución Smithsoniana, donde la placa superior había desaparecido en un robo en el almacén, pero hoy se halla en el Museo Nacional de Odontología. La única dentadura postiza completa que pude localizar pertenecía a la colección de Mount Vernon. Su historia aparecía envuelta en el misterio.

El juego completo en cuestión se descubrió en uno de los baúles de Martha Washington, decenios des-

pués de su muerte. Dado que ella no usaba dentadura postiza, se supone que perteneció a su marido. Nadie sabía quién lo había hecho ni cuándo, pero deduje que se habría fabricado entre 1789 y 1795. Según los expertos, las placas eran de plomo, algunas de las piezas superiores correspondían a incisivos superiores de caballo o asno e incisivos inferiores de vaca; los de la mandíbula inferior eran dientes humanos, más una pequeña talla de cáscara de nuez. Para mi sorpresa, algunas de las piezas de la placa inferior eran dientes humanos superiores. Más increíble todavía: aquella dentadura no se podía utilizar. Las superficies de las placas de plomo no se habían ahuecado para alojar la encía desdentada, sino que eran planas. Además, los muelles que unían las dos partes de la dentadura presionándolas contra las encías estaban arqueados hacia atrás, no hacia los lados; por tanto, la tensión habría empujado la dentadura hacia afuera cuando Washington abriera la boca. La única función de esta dentadura postiza podría haber sido la de rellenar el espacio de la cavidad bucal de Washington, quizá mientras posaba para un retrato. Con todo, esta dentadura me reveló datos sobre el tamaño y la forma de la mandíbula del presidente.

Guiado por las dimensiones de la dentadura postiza, comencé a reunir los datos para modelar el interior de la boca de Washington. Intentaría luego combinar esta información con la máscara y el busto de Houdon.

Reconstrucción de la cabeza

Junto con Matthew Tocheri, entonces en PRISM, tomé del busto las medidas correspondientes a la anchura del maxilar inferior donde conecta con la base del cráneo. Coincidió que Brenda Baker, de la Universidad estatal de Arizona, tenía una pequeña colección de restos óseos de soldados británicos de la guerra contra los franceses y los indios. Escaneamos una de las muestras, una mandíbula del tamaño aproximado de la de Washington; insertamos la mandíbula digitalizada en la cara del busto y la ampliamos ligeramente para ajustar el tamaño. Después, simulamos el envejecimiento de la misma mediante la eliminación de hueso y de todos los dientes, salvo el segundo premolar izquierdo inferior. Insertamos digitalmente la dentadura postiza de Mount Vernon sobre la mandíbula, como si estuviera colocada en la boca de Washington; ajustamos la curva del hueso y el lugar y la altura del premolar que debíamos encajar. Para refinar el proceso, escaneamos una réplica exacta de la dentadura de Greenwood de 1789 y la superpusimos sobre lo que ya teníamos. Como la barbilla de la mandíbula del soldado y la de Washington no encajaban a la perfección, rehicimos digitalmente la del soldado para conseguir la línea de la barbilla de Washington, más ancha e inclinada. Mediante un programa informático que Jeremy Hansen, de PRISM, diseñó para este proyecto, corregimos el ángulo trasero de la mandíbula para que reflejara la línea de la mandíbula de la máscara y la modificación que el hueso habría sufrido tras casi tres décadas de pérdida dental.

La reconstrucción del maxilar superior de Washington no resultó sencilla, pues nos faltaba la parte de arriba de la dentadura postiza fabricada por Greenwood en 1795. Sin embargo, el Museo Nacional de Odontología contaba con una réplica completa del original. Pensé en escanearla junto con la parte inferior del original, pero la simple comparación visual de ambas estructuras me reveló diferencias notables: la réplica se había limpiado para que luciera más hermosa que el original, de aspecto horroroso. Afortunadamente, existían fotografías de la réplica y el original juntos. Escaneamos la réplica y, a partir del tamaño de ésta, calculamos el tamaño del original. Con ello obtuvimos una imagen tridimensional de la dentadura postiza superior; modificamos la mandíbula superior del soldado para que encajara en aquélla y ajustamos esa estructura ósea para encajarla, a su vez, en el rostro del busto.

Para añadir estos datos al rostro de 45 años y, en última instancia, al de 19 años, me ayudé de los retratos que Charles Wilson Peale había realizado del Washington de 40 y 47 años. Tras observarlos durante horas, me llamó la atención que la distancia que separaba la nariz y la barbilla era mayor que en el busto o en los retratos del Washington más anciano. Para confirmarlo, comparamos las imágenes (bidimensionales) digitalizadas de los rostros de los cuadros con la versión digitalizada (tridimensional) del busto. En efecto, las distancias eran distintas. Y resultaba lógico que así fuera. En general, lo primero que se pierde son las muelas: Washington mostraba algo más alargada la parte inferior de la cara cuando tenía 40 y 47 años, debido, probablemente, al espacio que ocupaban los dientes frontales y el hueso en que se anclan.

Guiado por los retratos, Hansen utilizó su programa para adecuar la cara digitalizada del Washington de 53 años a la longitud de la cara más joven. Dado que la barbilla del Washington de 40 y 47 años era más asimétrica que en la máscara o en los retratos de mediana edad, ajustamos la barbilla en este sentido. Luego, importamos los maxilares modificados del soldado en lo que ahora representaba la cara de un cuarentón, los ajustamos para que encajaran y comparamos la imagen con la medida estándar del espesor de la piel. Dado que el Washington de 45 años habría tenido más hueso mandibular que el de 53 años, el ángulo posterior debía delinearse mejor. Por fin, obtuvimos la parte inferior del rostro de 45 años. Sirvió de modelo para el rostro de 19 años, donde el ángulo de la mandíbula se definió todavía más. Para el resto de la cara, alisamos o eliminamos las arrugas y los surcos, añadimos volumen a las mejillas (ya que con la edad se va perdiendo grasa) y acortamos la nariz y los lóbulos de las orejas (porque el cartílago aumenta con la edad).

Pero el trabajo no terminaba aquí. Debíamos estirar la piel bajo la barbilla y el cuello, para rejuvenecer la figura de 45 años y más aún la de 19. Una vez las cabezas estuvieron listas, acometimos la reconstrucción de los cuerpos. Después, uniríamos ambos digitalmente.

Reconstrucción del cuerpo

La estatua y los cuadros reflejaban, en cierto modo, una figura distinta de la que esperaríamos en un varón del siglo XX o XXI. Descubrí que, como era costumbre en el siglo XVIII entre las familias inglesas de clase alta,

RECONSTRUCCION DEL ROSTRO

El historial dental de Washington resultó crucial para completar la reconstrucción de la cabeza a las edades de 45 y 19 años. La pérdida de un diente implica también pérdida del hueso al que está sujeto y disminución de la altura de la mandíbula, que queda seriamente alterada en forma y tamaño. Una vez establecida la forma de la mandíbula a los 53 años, se añadió diente y hueso para reorganizar los maxilares con el fin de que éstos adoptaran la estructura que tenía en los años de juventud de Washington.

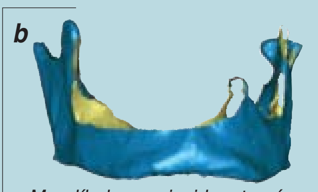
Se empezó por escanear una mandíbula sana (*a*) de tamaño similar a la de Washington y se insertó la imagen obtenida en la versión digitalizada del busto. Después, se simuló el envejecimiento de la mandíbula (*b*) mediante la eliminación de hueso y de todos los dientes, excepto el segundo premolar inferior izquierdo, la única pieza que le quedaba a Washington cuando tenía 57 años. Por fin, se insertó el modelo de la dentadura postiza del presidente sobre la mandíbula (*c*), ajustándose el hueso y el premolar para que encajaran. Luego, se añadió hueso a la mandíbula (*d*) para recrear la estructura facial inferior de las figuras de 45 y 19 años.

a



Imagen digitalizada de una mandíbula real de tamaño similar a la de Washington

b

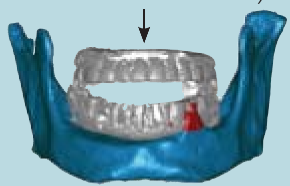


Mandíbula envejecida a través de un proceso de simulación

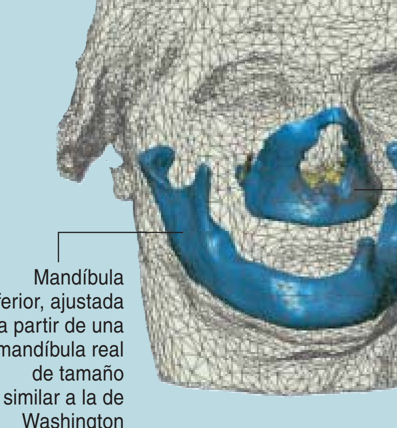
c



Dentadura postiza completa de Mount Vernon (placas de plomo; dientes de caballo y vaca en la superior, humanos en la inferior)



Modelo digital de la dentadura postiza de Mount Vernon insertada en la mandíbula envejecida

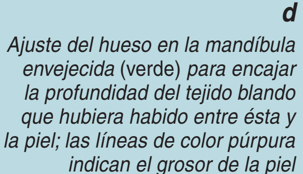


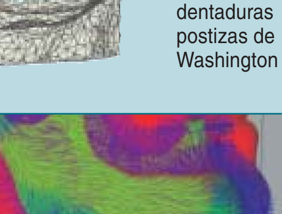
Modelo digital de la cara del busto

Mandíbula superior, basada en una réplica de una de las dentaduras postizas de Washington

Mandíbula inferior, ajustada a partir de una mandíbula real de tamaño similar a la de Washington

d





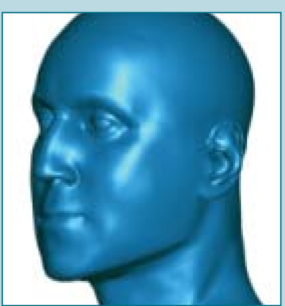
Ajuste del hueso en la mandíbula envejecida (verde) *para encajar la profundidad del tejido blando que hubiera habido entre ésta y la piel; las líneas de color púrpura indican el grosor de la piel*



A LOS 57 AÑOS



A LOS 45 AÑOS



A LOS 19 AÑOS

MOUNT VERNON LADIES' ASSOCIATION (*dentaduras*)

Washington había llevado corsé hasta la edad de 5 años. No conseguí encontrar un ejemplar, ni siquiera una descripción, de ese adminículo, pero debió de ser distinto del que usaban las mujeres y niñas para ajustarse la cintura. Modificaba el cuerpo masculino haciendo que pareciera, en ciertos aspectos, el de un bailarín clásico: obligaba a echar los hombros hacia atrás y a sacar pecho, y aplanaba y bajaba los omóplatos creando una larga pendiente que partía del cuello hacia los lados. Asimismo, acentuaba la endocurvatura natural de la parte inferior de la espalda, lo que empujaba el estómago hacia afuera. (Me enteré de que Washington había sido un excelente bailarín de salón; de hecho, guardaba apuntes detallados sobre cada uno de los distintos bailes.) Una vez modificado el desarrollo corporal del niño, la nueva figura se mantendría durante toda la vida. Esta es la razón por la que los retratos de los caballeros ingleses del siglo XVIII, incluidos los firmantes de la Declaración de Independencia, mostraban un aspecto claramente distinto de los retratos de hombres destacados de siglos posteriores.

La estatura de Washington, poco común para aquella época (probablemente 1,88 metros, y no 1,92 como se ha mencionado alguna vez, medida esta última que correspondería a la longitud de su féretro), se ha utilizado para justificar sus inusuales dotes de bailarín y jinete. Se cuenta que rodeaba fuertemente con sus largas piernas la panza del caballo conforme adelantaba a sus compañeros. Descubrí que esto podía hacerlo no sólo porque tuviera las piernas largas, sino también porque muchas de las razas de caballos utilizadas en el siglo XVIII eran de menor tamaño que la mayoría de las existentes en el siglo XIX. Otra de las teorías —fundada en una descripción incorrecta que hizo fortuna— sostiene que Washington era muy ancho de caderas, lo que

RECONSTRUCCION DEL CUERPO

A los 19 años, el fundador de los EE.UU. era alto, nervudo y delgado. Cuando la figura de cuerpo completo se instale en Mount Vernon en otoño de 2006, se ataviará con la ropa que habría llevado el Washington topógrafo. Su pelo caoba se recogerá por detrás en cola de caballo.





La estatua de Houdon de 1785 (*izquierda*) sería la representación que más fielmente reproduce la estatura del presidente: unos 188 cm. Los retratos son menos fiables. El famoso cuadro de cuerpo completo de Stuart (*derecha*), por ejemplo, contiene partes de Washington y parte de otros modelos



La unión de la cabeza con el cuerpo se realizó mediante un meticuloso "cosido" digital. Los bordes de cada parte no son lisos, sino que están formados por pequeños triángulos; juntarlos fue como resolver un complicado rompecabezas



Hasta la edad de 5 años, Washington llevó corsé. Este obligaba a echar los hombros hacia atrás y sacar pecho; creaba una larga pendiente que partía del cuello hacia los lados.

La indumentaria de la colección de Mount Vernon nos habla de un Washington, aunque inusualmente delgado, ligeramente más grueso que la estatua que lo representa.

Las pinturas de Trumbull ofrecen más pruebas de las largas piernas de Washington, con las que, se decía, rodeaba fuertemente la panza del caballo. (Washington, en el centro derecha, montando un caballo oscuro.)



A LOS 45 AÑOS
(a caballo)

A LOS 57 AÑOS

A LOS 19 AÑOS

BIBLIOTECA DE VIRGINIA (*escultura de Houdon*); GALERIA NACIONAL DEL RETRATO, INSTITUCION SMITHSONIANA/ART RESOURCE, NY (*retrato de Lansdowne*); GAVIN ASHWORTH (*traje*); ARQUITECTO DEL CAPITOL (*cuadro de Trumbull*)

explicaría su facilidad para sentarse en la silla de montar.

Para obtener información más detallada sobre la figura de Washington, pedí a los conservadores de Mount Vernon que me dejaran examinar su indumentaria. La moda de aquella época era ceñida, sobre todo alrededor del torso, caderas y piernas. No se conservaban sombreros, zapatos ni guantes (prendas que hubieran arrojado luz sobre el tamaño y la forma de la cabeza, manos y pies). Sin embargo, en las colecciones de Mount Vernon y de otros museos encontré trajes y prendas desde 1770 a finales de 1790 (mediana edad y últimos años), que Washington había usado y que no se habían retocado para que las utilizara después alguno de sus parientes. Con la colaboración del ojo experto de Linda Baumgarten, conservadora de tejidos del Colonial Williamsburg, tomé medidas lineales y volumétricas de la ropa de Washington, para cotejarlas luego con las de la estatua de Houdon.

Esta comparación resultó de gran ayuda. Según me acercaba a la estatua, instalada en el edificio del Congreso del estado de Virginia en Richmond, me percaté de que Washington parecía mucho más delgado, de caderas sobre todo, que en las descripciones y los retratos que lo representaban. Con la colaboración de Gene Cooper y Scout Van Note, de PRISM, comparé la longitud de los brazos y piernas, así como la distancia entre los hombros de la estatua con las medidas de la indumentaria. Resultaron ser casi idénticas, si bien la ropa correspondía a un hombre ligeramente más corpulento que el de la estatua. Realizamos los ajustes necesarios a la estatua digitalizada. A partir de ahí, acometimos la reconstrucción del cuerpo del Washington de 19, 45 y 57 años. Nos guiamos por información específica del personaje y por los parámetros generales que describen el cambio que experimenta el cuerpo humano con la edad.

Algunos documentos históricos sugerían que el Washington anciano mostraba un aspecto desgarbado, nada extraño, por lo demás, si tenemos en cuenta que sufrió varias enfermedades y sus dificultades en la ingesta. Ello corroboraba las medidas deducidas a partir de la ropa. Decidí, pues, usar el modelo de la estatua, tras el ajuste, para la construcción de la figura de 57 años. El cuerpo de 45 años requería un trabajo distinto. Los cuadros que Peale padre pintó de Washington a los 40 y 47 años muestran al general con abdomen y caderas tan poderosos como los de los retratos posteriores y como indicaba la indumentaria. Pero, ¿cómo podía estar más grueso si, precisamente a los 47 años, había tenido que soportar las penurias de la guerra, incluido el invierno de Valley Forge? Puesto que las molestias dentales de aquella época no remitían, quizá modificó su dieta y empezó a consumir alimentos más blandos que probablemente portaban mayor contenido en grasas. (Washington vivió tal agonía durante la batalla de Trenton en 1776 —tenía entonces 44 años— que su médico encargó a un herrero que fabricara unos alicates para así poderle extraer las piezas afectadas.) Por tanto, le di al cuerpo de 45 años más volumen, sobre todo alrededor del estómago y las caderas. En el caso de la figura de 19 años, aun cuando hubiera ya alcanzado la estatura definitiva, no habría llegado todavía a su madurez hormonal. El cargar con su equipo de trabajo lo habría mantenido en forma, pero con una constitución delgada y nervuda. Así es como lo he representado.

Por fin, colocamos las cabezas sobre los cuerpos. Se trataba de unir la imagen digital de cada testa con la del cuerpo correspondiente. Estas imágenes consisten en puntos que se conectan y tejen una red triangular; su unión, pues, recuerda el montaje de un rompecabezas de cientos de pequeños polígonos. Luego enviamos los datos de las figuras a una empresa de California, en donde se tallaron en espuma plástica las cabezas de los tres presidentes.

Las tres cabezas viajaron a Nueva York, donde se construyeron los moldes con los que fabricar las cabezas en arcilla, que se unirán (según nuestro rompecabezas digital) a cuerpos realizados en el mismo estudio. Estos se fabricarán con espuma densa recubierta de escayola, acolchándola donde sea necesario para simular la blandura de un cuerpo real. Trabajé con el escultor Stuart Williamson para conferirle a cada rostro una expresión única, antes de que se tomara un molde de arcilla para fabricar las reproducciones en cera. La artista Sue Day pintó las caras de cera para que parecieran lo más vivas posible; tomó la descripción que Gilbert Stuart hizo de Washington: un pálido rostro de mejillas rubicundas y ojos azul grisáceo. En las dos figuras más jóvenes se implantará cabello pelirrojo que se recogerá por detrás, siguiendo la moda de las pelucas de la época. La figura de 57 años lucirá el pelo canoso para simular el aspecto empolvado que habría mostrado en el acto de investidura.

Espero que cada una de las tres representaciones del primer presidente estadounidense deje traslucir algo del lado humano y dinámico de un personaje que, a pesar de su importancia histórica, continúa siendo gris para la mayoría. Este proyecto, en el que han colaborado expertos de distintos campos de investigación, constituye un buen ejemplo del potencial que encierra la fusión entre la ciencia, el arte y la historia.

El autor

Jeffrey H. Schwartz es profesor de los departamentos de antropología e historia y filosofía de la ciencia en la Universidad de Pittsburgh. Investigador asociado del Museo Americano y el Museo Carnegie de Historia Natural, cumple tareas de antropólogo forense en el juzgado de instrucción del condado de Allegheny, Pennsylvania. Centra su investigación en la evolución de humanos y primates, la teoría de la evolución, la biología del desarrollo y la morfología ósea comparada.

Bibliografía complementaria

George and Martha Washington: Portraits from the Presidential Years. Ellen G. Miles. Smithsonian Institution; National Portrait Gallery, 1999.

His Excellency: George Washington. Joseph J. Ellis. Vintage, 2005.

1776. David McCullough. Simon & Schuster, 2005.

Skeleton Keys: An Introduction to Human Skeletal Morphology, Development, and Analysis. Jeffrey H. Schwartz. 2.ª edición revisada. Oxford University Press (en prensa).

Motores de reconoci

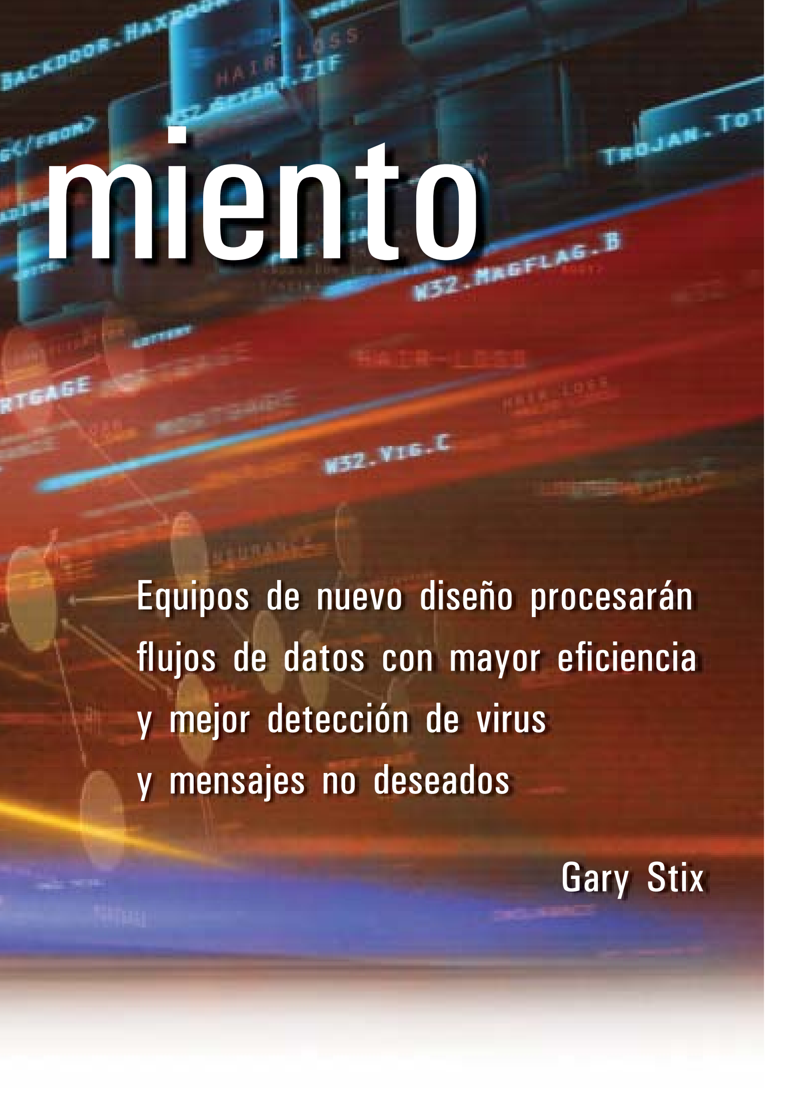


RYAN ETTER

La aparición, cada pocos años, de procesadores de velocidad creciente ha permitido a la industria informática encubrir multitud de deficiencias; entre las más graves, la ineficiencia y el desmesurado tamaño de los programas de aplicación. Sin embargo, esta situación privilegiada parece desmoronarse conforme el consumo energético se dispara y las placas donde se asientan los microprocesadores van camino de cumplir más funciones de calefacción que de cómputo. La compañía Intel (donde siempre ha imperado la sacrosanta ley de Moore) y otros fabricantes de equipos han optado por el diseño de ordenadores provistos de varios microprocesadores que operan a menor velocidad.

Pero los sistemas multiprocesadores vienen con equipaje. En primer lugar, el desarrollo de programas que repartan las tareas computacionales entre varios procesadores supone una carga pesada, e indeseable, para muchos programadores. Por otra parte, varias de las aplicaciones utilizadas en la Red (desde la búsqueda de virus hasta la lectura de documentos codificados en XML, de "eXtensible Markup Language") no se prestan fácilmente al procesamiento en paralelo.

Averiguar si un mensaje contiene una palabra que denote "spam" (mensajes basura, o no deseados) como "lotería" o "Viagra", requiere la evaluación de una serie de parámetros: ¿Amén de "lotería", contiene el documento la palabra "premio" u otras sinónimas? La fragmentación de este tipo de tareas entre varios procesadores entraña notables dificultades técnicas. De ahí que los ingenieros hayan optado por conferir a los coprocesadores funciones más especializadas. El microprocesador principal conserva la jefatura en la distribución de las tareas clave del sistema operativo. Entretanto, los diseños de los procesadores concebidos para cazar virus, o *spam*, o para el tratamiento de páginas XML, han tomado ejemplo del procesamiento de gráficos, campo que cuenta desde hace mucho con unidades especializadas. En estos últimos años, los "motores aceleradores de intrusión-detección" han tomado a su cargo tareas encomendadas hasta ahora a las unidades centrales de proceso (CPU), cada vez más sobrecargadas. Unos pocos laboratorios, industriales y universitarios, han comenzado a llevar este concepto aún más lejos, dando cabida a todos los tipos de flujos de in-



miento

Equipos de nuevo diseño procesarán flujos de datos con mayor eficiencia y mejor detección de virus y mensajes no deseados

Gary Stix

formación (“streamed information”) que circulan por una red. Han creado, en esencia, un procesador universal de flujos, fácil de reprogramar y capaz de realizar múltiples aplicaciones, ya sea la vigilancia de un “cortafuegos” o la compresión de archivos.

Motor de concordancia de patrones

El laboratorio de investigación de IBM en Zúrich ha “enredado”, en sentido etimológico, a varios premios Nobel para la creación de un microscopio de barrido por efecto túnel y el estudio de la superconductividad a temperaturas elevadas. El laboratorio ha servido también de nexo para el desarrollo de equipos y programas destinados a redes. En Hot Chips, un congreso que el IEEE (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica) organizó en agosto de 2005 en la Universidad de Stanford, Jan van Lunteren, de IBM Zúrich, presentó un procesador de flujos de datos (un “motor de concordancia de patrones” para atrapar virus, *spam* y otros elementos nocivos) que había desarrollado conjuntamente con su compañero Ton Engbersen.

El procesador de IBM era una secuela de investigaciones sobre la circulación de datos a través de equipos de Internet enrutadores. Van Lunteren trabajó en IBM Zúrich en las postrimerías del decenio pasado; se dedicó al refinamiento de las técnicas de consulta de las tablas de datos de los enrutadores con el fin de proporcionar la información que encamine por la red a los paquetes de datos que viajan por ella. Los enrutadores deben examinar decenas de millones de paquetes por segundo e inspeccionar decenas de miles de entradas en sus bases de datos, para determinar cuál será el próximo enlace en la red, antes de enviar paquetes de datos por uno de sus múltiples puertos de salida. Van Lunteren ideó una función “resumen”, que en la jerga llaman *hash*, para rebuscar en las tablas de enrutamiento. Se trata de una fórmula matemática que produce un número, el índice “resumido”, que indica en una tabla, alojada en la memoria del procesador, cuál es la puerta de salida idónea hacia el siguiente enrutador de la red.

Van Lunteren diseñó un algoritmo basado en una función resumen, la búsqueda por “tabla equilibrada de enrutamiento” (o BaRT, de “balanced routing table”), que comprime de modo impresionante el número de bits necesarios para almacenar en la memoria las tablas de enrutamiento. El sistema BaRT, que se implantaría en varios productos de IBM, maneja 25 millones de paquetes por segundo y podría llegar a encargarse de un volumen de tráfico de datos cuatro veces mayor.

Para la búsqueda en tablas de enrutamiento bastaría consultar una breve secuencia de datos en la porción inicial del paquete, el encabezamiento que indica su destino. Sin embargo, debido a la avalancha de *spam*, virus y demás contenidos malignos, los procesadores de la red se ven obligados a inspeccionar más a fondo el contenido del paquete, en busca de signos reveladores de la nocividad del remitente. Otro tanto ocurre con lenguajes como el XML, que codifican o descodifican documentos complejos e imponen pesadas cargas a los equipos de las redes. La función de resumen ideada por van Lunteren para el enrutamiento ha resultado esencial para el procesador de flujos de IBM.

Allende von Neumann

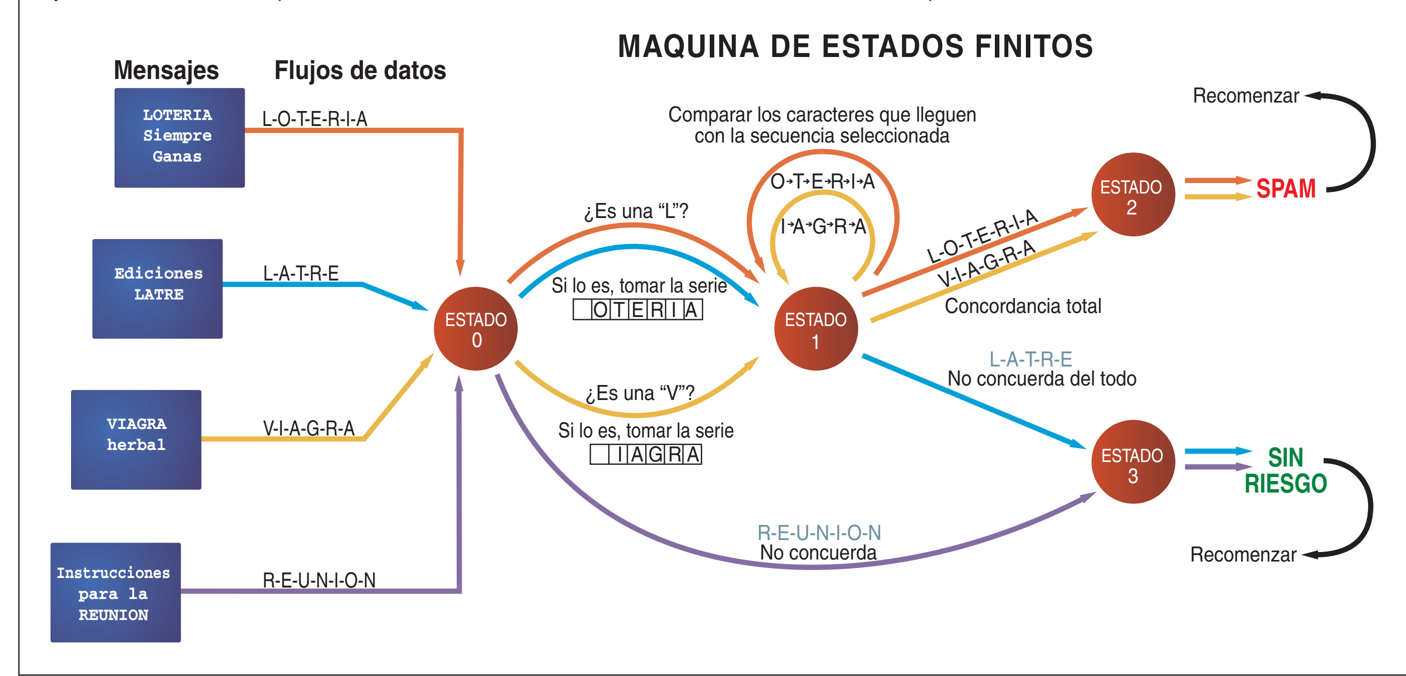
Los procesadores al uso requieren un gran número de instrucciones para habérselas con los códigos XML o para buscar programas nocivos (“malware”); ello provoca atascos, porque a veces son necesarias decenas de ciclos de reloj para manipular sólo un carácter. A pesar de los numerosos refinamientos, las CPU típicas todavía se basan en una estructura arquitectónica ideada hace 60 años por el matemático John von Neumann, junto con dos pioneros de las computadoras electrónicas, J. Presper Eckert y John Mauchly. En la arquitectura de von Neumann, se busca una instrucción en una dirección de la memoria, se ejecuta y, después, se actualiza un contador de programa con la dirección de la instrucción siguiente. El ciclo se repite, a menos que una instrucción ordene explícitamente otra cosa y haga que el procesador salte a otro punto del programa. Si el procesador se enfrenta a una tarea que entrañe cierta complejidad (la evaluación de si un determinado carácter es lícito en la codificación XML, por ejemplo) habrá de ir rodando por una multitud de instrucciones y de ciclos de reloj antes de completarla.

Van Lunteren y Engbersen tomaron en préstamo un esquema teórico de la infancia de las ciencias de cómputo, a saber, una máquina de estados finitos (“finite state machine”) que arraiga en los campos roturados por uno de los pioneros, Alan M. Turing. Esta corresponde

¿MULTICONCORDANCIA O COMPARACION SECUENCIAL?

Las máquinas de estados finitos procesan flujos de datos mediante el cotejo simultáneo de cada carácter aferente con un gran número de caracteres indicadores de "basura", almacenados en la memoria. En una máquina de tipo von Neumann, en cambio, los caracteres almacenados en la memoria se evalúan uno a uno.

En el estado 0, la máquina de estados finitos empieza por comparar el carácter "L" con otros dos, "L" y "V", para determinar si se trata de la primera letra de "LOTERIA" o de "VIAGRA", dos palabras almacenadas típicas de correo basura. En cuanto se detecta una concordancia, la máquina salta al estado 1 y compara los sucesivos caracteres entrantes con una ristra de caracteres ya almacenados, como pueden ser "OTERIA" o "IAGRA". Si encuentra una coincidencia completa con una de estas dos secuen-



a una descripción simplificada de la operativa de cualquier máquina computadora: define el modo en que realiza operaciones paso a paso y adopta, en cada momento determinado, un conjunto finito de estados internos. En un plano abstracto, la propia arquitectura de von Neumann puede caracterizarse mediante una máquina de estados finitos. Ahora bien, la máquina de estados finitos ideada por van Lunteren y Engbersen se distingue de una CPU de arquitectura von Neumann en que prescinde del contador de programa.

A diferencia de la máquina que toma nombre de von Neumann, la de estados finitos de van Lunteren y Engbersen evalúa de forma simultánea numerosos parámetros en un ciclo, en vez de examinar sólo uno, como ocurre en procesos controlados por un contador de programa. Esa es una de las razones por las que desde hace años se han venido utilizando máquinas de estados finitos en los procesadores de gráficos, en los sistemas de reconocimiento de voz y en el diseño de equipos. Por otra parte, las máquinas de estados finitos no se prestan fácilmente a la reprogramación, por lo que carecen de la flexibilidad y universalidad de las CPU de tipo von Neumann.

Pero las angosturas provocadas por la naturaleza secuencial de las CPU al uso han empezado a limar algunas diferencias entre uno y otro tipo de procesadores. Los equipos de estados finitos de IBM, sea por caso, admiten la reprogramación con una actualización de las aplicaciones en el caso de proliferación de nuevos virus o de cambios en los estándares del XML.

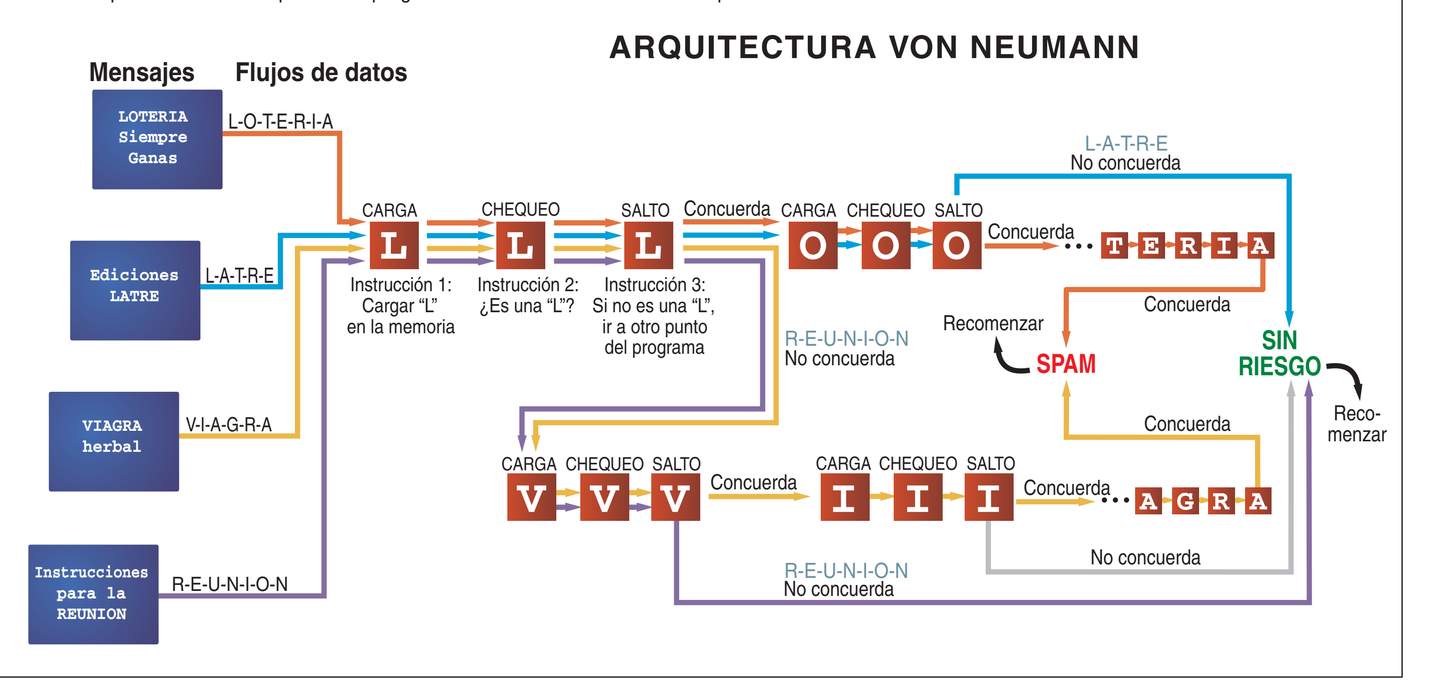
El diseño del procesador de van Lunteren y Engbersen se basa en un diagrama de estado, una gráfica compuesta por nodos, o "estados", representados mediante círculos, y líneas, o "vínculos", entre los nodos, que simbolizan transiciones de un estado a otro. El torniquete que los viajeros deben atravesar para acceder al metro viene a ser una máquina de estados finitos. Su nodo inicial corresponde al estado de "paso cerrado". La validación del billete se indica en la gráfica mediante una línea que describe una "transición" desde el estado presente al nodo "paso abierto". El paso a través del torniquete se denota mediante otra línea que señala una transición de retorno al nodo "paso cerrado".

En la máquina de estados finitos de IBM, un estado dado puede vincular a más de dos nodos. En una aplicación real de procesamiento de flujos, un nodo puede estar enlazado a otros muchos; todos los enlaces se evaluarían al mismo tiempo antes de tomar la decisión de pasar a un nuevo estado en el diagrama. Para buscar "basura" en un flujo de datos entrante, el procesador leería en la memoria la palabra "lotería". Evaluaría no sólo si una "o" iba a continuación de una "l" en una serie aferente de caracteres, sino también si un mensaje basura pudo haber insertado una barra baja ("l_o") con la intención de burlar a un bloqueador de *spam*. Podría además, dentro de la misma búsqueda, ejecutada en un solo ciclo de procesador, buscar la "l" de "lotería", la "V" de "Viagra" y muchos otros

MELISSA THOMAS

cias, la máquina pasa al estado 2, que indica la detección de una palabra corriente en los mensajes basura. De no producirse tal coincidencia, como ocurre con la palabra “LATRE”, se traslada al estado 3, que sugiere que no hay *spam* al acecho. Si la primera letra del *input* no casa con las palabras almacenadas, como ocurre con la “R” de “REUNION”, se salta directamente del estado 0 al 3.

En un sistema von Neumann, cada uno de los caracteres aferentes se compara por turno, uno a uno, con un carácter almacenado. Además, se precisan tres (o más) instrucciones para cada carácter: una para cargarlo, otra para ver si es el buscado, y una tercera para saltar a otro punto del programa si éste no coincide con el que se busca.



caracteres contenidos en su memoria. En un procesador estándar, cada uno de estos pasos debería ejecutarse de forma secuencial.

La aplicación de una máquina de estados finitos al control y análisis de flujos mejora de forma notable el rendimiento, al menos en el laboratorio. En Hot Chips, Van Lunteren informó que la máquina de estados finitos de IBM procesa caracteres a un ritmo de hasta 20 gigabits por segundo en el caso de virus, mensajes basura y otras aplicaciones, entre 10 y 100 veces más deprisa que un procesador al uso. El algoritmo BaRT constituye un elemento clave para este dispositivo. En numerosas máquinas de estados finitos, el almacenamiento de las reglas de transición en un diagrama de estados ocupa mucha memoria. IBM, en cambio, almacena en su máquina de estados finitos hasta 25.000 caracteres en menos de 100 kilo-octetos de memoria, lo que puede llegar a representar sólo 1/500 de lo exigido por otras máquinas de estados finitos. Merced a la eficiencia del algoritmo inicialmente ideado para tablas de enrutamiento, el aumento de las necesidades de memoria es lineal: si el número de reglas de transición se eleva de 1 a 10, las necesidades de memoria aumentarán en un múltiplo similar. En muchas máquinas de estados finitos, un aumento de este orden exigiría un espacio de almacenamiento 100 veces mayor.

IBM ofrece ya la técnica de estados finitos para aplicaciones “a la medida” y está evaluando el procesador en varios productos. Pero IBM no está sola en la adopción de este concepto: también algunas universidades y otras compañías han desarrollado máquinas de estados finitos programables. John Lockwood, profesor de la Universidad de Washington en St. Louis, se cuenta entre los fundadores de Global Velocity, una compañía que comercializa uno de tales procesadores. Según Van Lunteren, la particularidad del diseño de IBM reside en su capacidad para manejar una amplia gama de aplicaciones, lo que le convierte en un procesador universal para cualesquiera aplicaciones de procesamiento de flujos. La complejidad y refinamiento de estos procesadores puede continuar evolucionando conforme el procesamiento de flujos y otras tareas críticas se alejan cada vez más del control de la unidad central de proceso. Este trabajo garantiza que los legados de Turing y de von Neumann sigan coexistiendo a pocos centímetros uno de otro en una misma placa de circuito.

Bibliografía complementaria

THE ALPHABETS, WORDS AND LANGUAGES OF FINITE STATE MACHINES. Explicación del funcionamiento de las máquinas estado-finitas en: www.c3.lanl.gov/mega-math/workbk/machine/mabkgd.html.

XML ACCELERATOR ENGINE. Jan van Lunteren, Ton Engbergen, Joe Bostian, Bill Carey y Chris Larsson. Primer taller internacional sobre procesamiento XML de altas prestaciones, 18 de mayo de 2004. Disponible en: www.research.ibm.com/XML/IBM_Zurich_XML_Accelerator_Engine_paper_2004May04.pdf.

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

Equilibrio en bicicleta

La vida es como una bicicleta:
hay que avanzar para no perder el equilibrio.
Albert Einstein

¿De qué modo los "esforzados de la ruta" se mantienen en equilibrio y guían sus monturas? El problema es difícil. En la caravana del Tour hay una discusión acalorada al respecto. Un motorista sostiene que, para girar a la derecha, primero se debe girar el manillar un poco hacia la izquierda. Un ciclista exclama: "Pero, ¿cómo? ¡Ni que decir tiene que para virar a la derecha hay que girar el manillar hacia la derecha!"

La física, vamos a verlo, asegura que, pese a la disparidad de maniobra, ambos vehículos viran conforme al mismo fenómeno. ¿De qué fenómeno se trata? ¿Del efecto giroscópico o de la aceleración centrífuga?

Para empezar, analicemos el equilibrio de un vehículo de dos ruedas. La máquina es inestable: si la dejamos de pie, quieta, caerá a un lado o a otro. Observemos en cambio su comportamiento si la impulsamos: permanecerá vertical durante varios metros. El motorista cree que el equilibrio de los biciclos resulta del efecto giroscópico: "Son como las peonzas, estables sólo cuando giran. Las ruedas son unas peonzas con el eje de rotación horizontal."

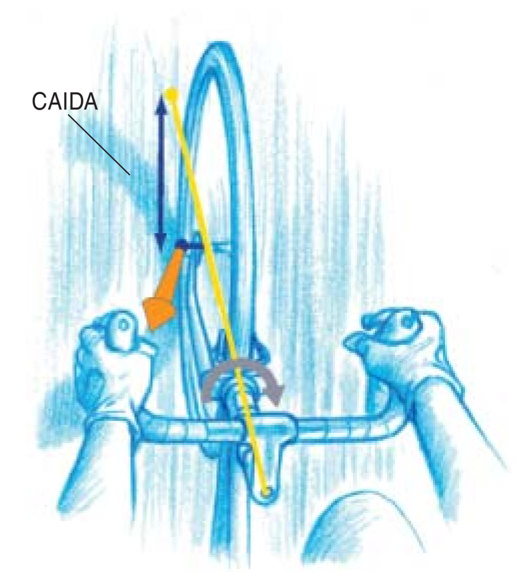
Llámase efecto giroscópico a la resistencia que se opone a todo cambio de orientación del eje de un objeto en rotación; a él se debe que la peonza no se caiga. Pero el motociclista no tiene razón: el efecto giroscópico debido a la rotación de las ruedas está presente en la bicicleta, aunque es demasiado débil (la masa de las ruedas es pequeña y no giran con celeridad suficiente). El factor determinante es la fuerza centrífuga.

La fuerza centrífuga

La fuerza centrífuga es esa fuerza que tiende a separarnos del asiento cuando tomamos una curva. Sobre su naturaleza hay controversia: existe según unos; no existe, según otros. Así, cualquiera (un observador externo, diría un físico) que observe el viraje brusco de un vehículo, verá que el pasajero tiende a seguir en línea recta y que el vehículo, al girar, le obliga a curvar su trayectoria. Olvidemos esa disputa bizantina y adoptemos el punto de vista del pasajero, quien percibe una fuerza centrífuga horizontal dirigida hacia el exterior de la curva. Esa fuerza está aplicada en el centro de gravedad del conjunto; su intensidad es igual al producto de la masa del pasajero o piloto por el cuadrado de su velocidad dividido por el radio de la curva: así, la fuerza centrífuga que sufre un ciclista que recorre una curva de 10 metros de radio a 36 kilómetros por hora tiene la misma intensidad que su peso, pero es horizontal, mientras que el peso es vertical.

"Ahora entiendo por qué las pistas de los velódromos están inclinadas", comenta el ciclista. "Mas, ¿por qué





1. La caída de la horquilla de un vehículo de dos ruedas es la distancia que media entre el punto de contacto de la rueda anterior con el suelo y el punto de intersección de la prolongación (*en amarillo*) de la horquilla con el suelo. Cuando el ciclista o el motorista se inclina hacia un lado, hacia la derecha por ejemplo, la reacción del suelo crea un par, proporcional a la caída, que tiende a hacer girar el manillar hacia la derecha. Así, para virar, basta con ladearse, como hacen los motociclistas de competición, que no giran el manillar.



2. El equilibrio de un vehículo de dos ruedas está asegurado cuando la resultante del peso y la fuerza centrífuga se halla en el plano del bastidor de la máquina (*como en la bicicleta del dibujo*). Para ladear sus pesadas máquinas, los motoristas contraviran y así crean una fuerza centrífuga que las incline hacia el interior de la curva.

traemos a colación los virajes cuando lo que queremos es explicar el equilibrio?" Le respondemos que, para mantenerse sentado a poca velocidad, un ciclista no mueve los brazos como un funámbulo: cuando siente que va a caer hacia la derecha, gira el manillar hacia la derecha e inicia un giro en ese mismo sentido. Entonces, la fuerza centrífuga se ejerce hacia la izquierda y lo endereza. Cuando aumenta la velocidad, los movimientos del manillar necesarios para obtener la misma fuerza centrífuga (proporcional al cuadrado de la velocidad) son menos amplios y le cuesta menos guardar la estabilidad. A partir de una cierta velocidad, carece de sentido actuar sobre el manillar: la bicicleta es estable naturalmente, ya que el manillar gira de por sí cuando el vehículo se inclina.

Eso podemos comprobarlo moviéndonos junto a una bicicleta y sujetándola sólo por el sillín. Inclinémosla alternativamente a la izquierda y a la derecha para que la rueda anterior pivote: cuando inclinamos la bicicleta hacia un lado, el manillar gira también hacia ese lado; a una velocidad suficiente, en esa rotación automática del manillar reside la clave de la estabilidad.

Ese comportamiento del manillar procede de la inclinación de la horquilla y de su forma. La prolongación del eje de la horquilla corta el suelo en un punto adelantado al punto de contacto de la rueda con el suelo. La distancia entre esos puntos se denomina caída de la horquilla. Cuando la bicicleta se inclina a la derecha, la reacción del suelo ante el peso de máquina y ciclista, dirigida hacia arriba, está a la izquierda del plano del vehículo: la prolongación de esa fuerza de reacción ya no corta al eje de rotación del manillar; por tanto, la fuerza crea un par que hace girar el manillar hacia la derecha. Durante la curva así acometida aparece una fuerza centrífuga, que apunta hacia la izquierda y estabiliza la bicicleta. La rotación del manillar es proporcional al par ejercido y, por tanto, a la distancia entre la recta soporte de la fuerza y el eje de rotación del manillar, distancia que es tanto mayor cuanto mayor sea la caída. A mayor caída de la horquilla, tanto más estable será la bicicleta. Las bicicletas de montaña resultan bastante inestables porque son de caída corta: se las dota de horquillas casi verticales para facilitar su manejo. Téngalo en cuenta y no enseñe a sus hijos a montar en bicicleta con un prototipo de montaña.



3. No es el efecto giroscópico de la rueda, sino la fuerza centrífuga la que impide que la bicicleta vuelque.

Ladearse para girar

Si bicicletas y motos son tan estables, ¿cómo logramos que viren? A velocidad elevada, no basta con girar el manillar, pues la fuerza centrífuga haría que volcáramos hacia el otro lado. En una curva, el motorista o ciclista se inclina hasta que la resultante del peso y la fuerza centrífuga se halla en el plano del bastidor del vehículo; en esa configuración, no se ejerce ninguna acción de palanca y la inclinación se mantiene constante.

Para virar, hay que ladearse; para vencer la estabilidad de los vehículos de dos ruedas a alta velocidad, importa contravirar para aprovechar la fuerza centrífuga. Cuando desea girar a la derecha, el motorista empuja (paradójicamente) la empuñadura derecha del manillar: la máquina inicia un viraje a la izquierda. La fuerza centrifuga dirigida hacia la derecha tiende entonces a ladearlo hacia la derecha y, bajo el efecto de la caída de la horquilla, la rueda anterior gira hacia la derecha para adaptarse a la curva. Evidentemente, todo es cuestión de dosis.

Para salir de la curva, hay que devolver la moto a la vertical aumentando la fuerza centrífuga, lo que se logra reduciendo el radio de giro y, sobre todo, acelerando.

Mover el manillar hacia la derecha para ir a la izquierda parecerá absurdo, pero el ciclista aprovecha un mecanismo similar cuando rueda "sin manos". Un leve golpe de cadera a la izquierda hace que la bicicleta inicie un viraje a la izquierda y se incline hacia la derecha en virtud de la fuerza centrífuga. Gracias a la caída de la horquilla, el manillar revira hacia la derecha. Con tan escasa velocidad, no cuesta modificar el equilibrio de la máquina: en bicicleta, basta un movimiento del cuerpo, mientras que en moto es necesario contravirar.

BRUNO VACARO (*dibujos*)

JUEGOS MATEMÁTICOS

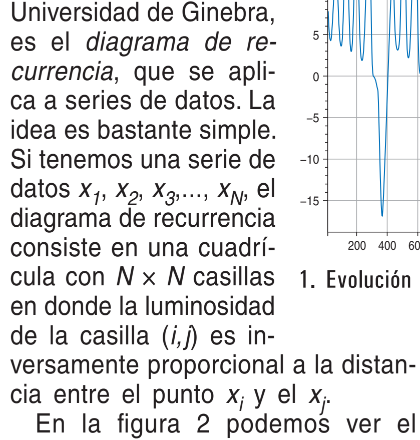
Juan M.R. Parrondo

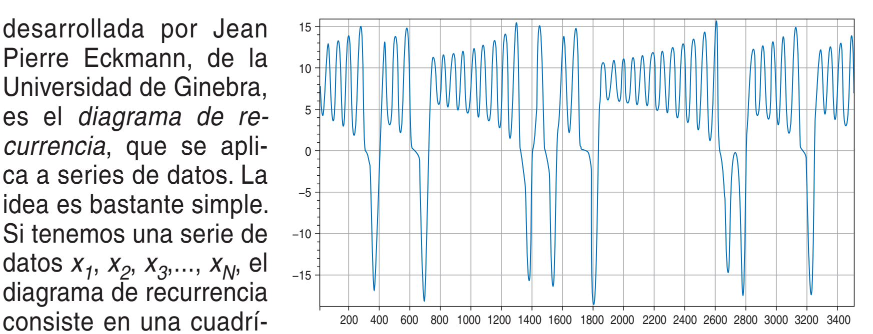
Caos, recurrencia y consonancia musical

Desde que Isaac Newton creara el cálculo infinitesimal para estudiar el movimiento de los astros, una de las aplicaciones más fructíferas de la matemática ha sido el estudio del cambio. Sabemos cómo expresar matemáticamente las leyes que rigen la evolución de un sistema, mediante las llamadas *ecuaciones diferenciales*, y conocemos un sinfín de técnicas para resolverlas. También disponemos de una herramienta muy potente, la *transformada de Fourier*, que nos permite detectar periodicidades en el comportamiento de una magnitud.

Sin embargo, después de tres siglos de desarrollo continuado, y en gran parte gracias a la aparición de los ordenadores, el estudio de los sistemas que cambian en el tiempo experimentó una revolución con el descubrimiento de los *sistemas caóticos*. Fue el meteorólogo Edward N. Lorenz quien, al estudiar un modelo muy simple de la atmósfera, descubrió que una pequeña perturbación podía modificar de forma drástica el comportamiento futuro del sistema. En la figura 1 podemos ver cómo varía una de las variables del modelo de Lorenz. En períodos breves de tiempo la variable oscila de forma regular, pero en ocasiones se aleja de este comportamiento oscilatorio de un modo aparentemente imprevisible.

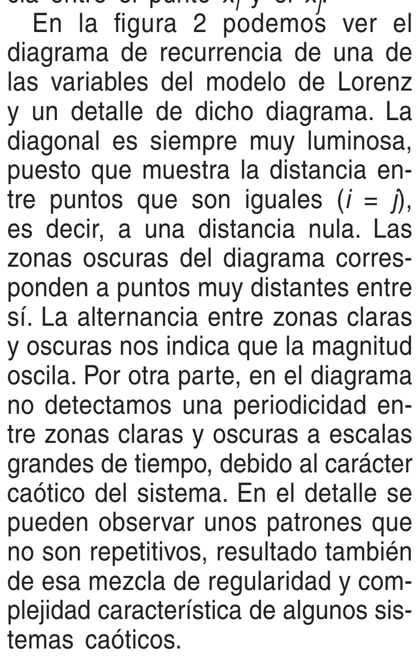
En torno a los sistemas caóticos surgieron nuevas técnicas para analizar cómo cambia una magnitud con el tiempo. Una técnica muy conocida, desarrollada por Jean Pierre Eckmann, de la Universidad de Ginebra, es el *diagrama de recurrencia*, que se aplica a series de datos. La idea es bastante simple. Si tenemos una serie de datos $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_N$, el diagrama de recurrencia consiste en una cuadrícula con $N \times N$ casillas en donde la luminosidad de la casilla (i,j) es inversamente proporcional a la distancia entre el punto x_i y el x_j.





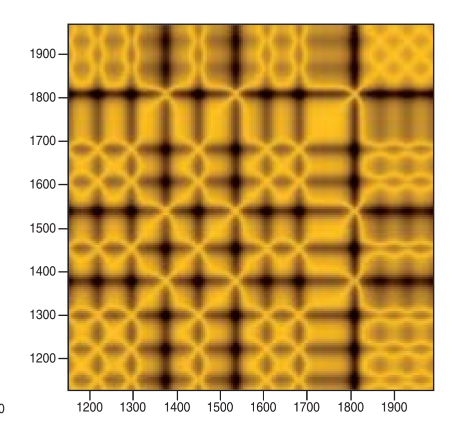
1. Evolución de una de las variables del modelo de Lorenz.

En la figura 2 podemos ver el diagrama de recurrencia de una de las variables del modelo de Lorenz y un detalle de dicho diagrama. La diagonal es siempre muy luminosa, puesto que muestra la distancia entre puntos que son iguales ($i = j$), es decir, a una distancia nula. Las zonas oscuras del diagrama corresponden a puntos muy distantes entre sí. La alternancia entre zonas claras y oscuras nos indica que la magnitud oscila. Por otra parte, en el diagrama no detectamos una periodicidad entre zonas claras y oscuras a escalas grandes de tiempo, debido al carácter caótico del sistema. En el detalle se pueden observar unos patrones que no son repetitivos, resultado también de esa mezcla de regularidad y complejidad característica de algunos sistemas caóticos.



El diagrama de recurrencia es en principio una herramienta meramente visual. Permite hacerse una idea de cómo evoluciona la variable en cuestión. En la figura 3 (*izquierda*) hemos representado el diagrama de recurrencia de una señal perfectamente periódica, sen(t). En este caso los patrones son también periódicos, como cabría esperar. Es interesante comprobar cómo se modifica el diagrama cuando añadimos ruido, es decir, una cierta cantidad aleatoria, a la señal periódica original. El resultado se muestra en la figura 3 (*derecha*). El diagrama se ha difuminado ligeramente y ha aparecido una textura en forma de malla, más visible en las zonas oscuras. Sin embargo, la estructura de la variable original se ha mantenido. Por lo tanto, el diagrama de recurrencia es útil para analizar variables aunque estén perturbadas por algún ruido.

En la figura 4 mostramos diagramas de series de datos reales. El de la izquierda se ha obtenido con el número medio de manchas solares por año, desde 1700 hasta 1979 (280 datos). Se aprecia cierta periodicidad de unos 11 años, bien conocida. Pero, al igual que en el modelo de



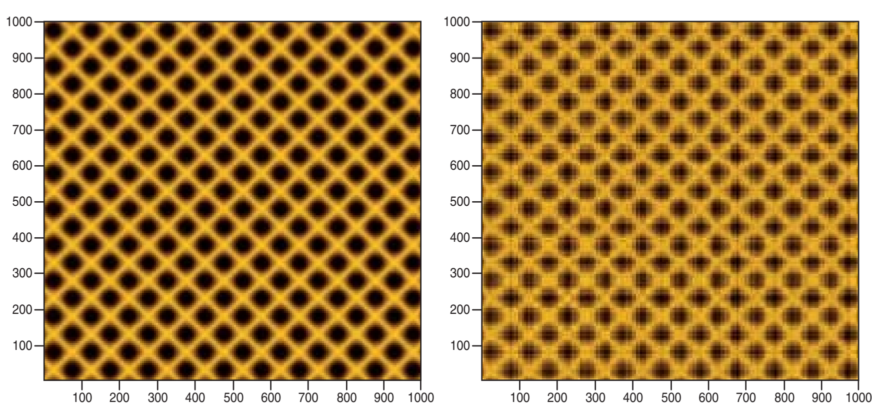
2. El diagrama de recurrencia de la variable del modelo de Lorenz que se representa en la figura 1. En la figura de la izquierda se puede ver el diagrama completo (3500 puntos) y en el de la derecha un detalle en torno a la diagonal (del punto 1150 al 2000). Los números de los ejes indican, como en las gráficas siguientes, el número de dato en la serie de datos.

Lorenz, esta periodicidad presenta irregularidades considerables, lo que nos indica que detrás de la evolución de las manchas se puede esconder una dinámica caótica. Finalmente, el diagrama de la derecha es el del índice bursátil Dow-Jones semanal, desde 1900 hasta 1996 (4977 datos). La textura es más uniforme, como corresponde a sistemas muy aleatorios. Vemos también que el diagrama se oscurece en la esquina superior izquierda y en la inferior derecha. Por una razón: los puntos alejados en el tiempo están también alejados entre sí, debido a que el Dow-Jones, a pesar de sus fluctuaciones, tiende a crecer en el tiempo.

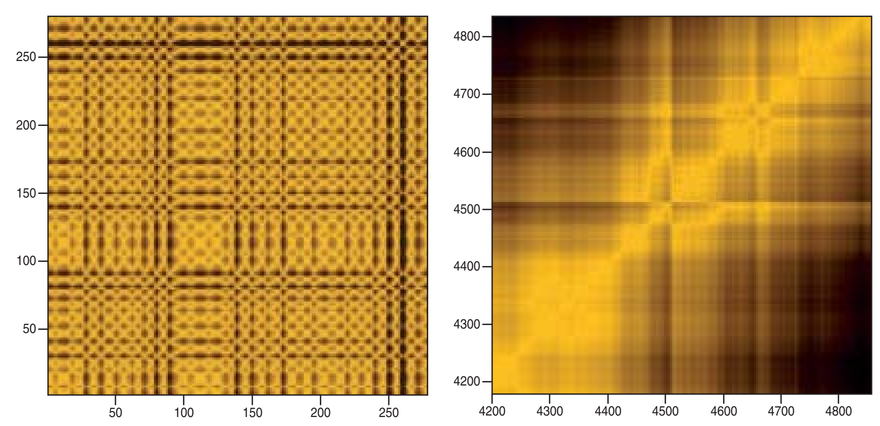
Los diagramas de recurrencia son una herramienta muy popular en el análisis de series temporales. Existen varios programas informáticos para elaborarlos. Los diagramas que hemos mostrado están hechos con el programa gratuito *Visual Recurrence Analysis (VRA)* de Eugene Kononov, que se puede descargar de Internet y es muy fácil de utilizar. Si tienen una serie de datos, cualquiera que sea su origen, les recomiendo que los analicen con el VRA. Es muy sencillo, y quizá les ayude a entender mejor el comportamiento de su serie (aunque lo realmente difícil es interpretar los diagramas).

Recientemente, Lluis Lligoña, del Centro de Investigación Puig Rodó de Gerona, junto con investigadores italianos y norteamericanos, ha aplicado esta técnica a un viejo problema del que ya hemos hablado en esta sección: la consonancia musical (*La teoría matemática de la consonancia*, marzo de 2004). Para ello, ha generado un sonido mezcla de dos tonos puros: uno de frecuencia fija y otro que va ascendiendo de forma suave, un *glissando* que barre todos los intervalos, desde el unísono (misma nota) hasta la octava.

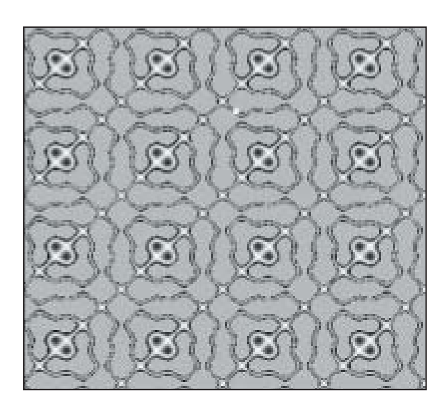
En la figura 5 se pueden ver algunos de los resultados de Lligoña, aparecidos en el *Electronic Journal of Theoretical Physics*. Son dos detalles del diagrama de recurrencia. El de la izquierda corresponde a una zona en donde el intervalo es consonante, 2000 puntos en torno a la quinta justa, intervalo en donde las frecuencias están en una relación 3:2, mientras que el de la derecha está centrado alrededor de la quinta disminuida, un intervalo disonante de frecuencias 64:45. En la figura se aprecia fácilmente que la disonancia musical produce también una "disonancia visual". Lligoña y sus colaboradores han estudiado de forma cuantitativa algunas características del diagrama, como la densidad de puntos claros, y las han relacionado con la consonancia de los intervalos. Se consigue así una explicación de la consonancia muy diferente de la aceptada hasta la fecha, debida a Plomp y Levelt (*véase Juegos* de marzo de 2004) y que no es aplicable a tonos puros. No obstante, la teoría de Plomp y Levelt ha explicado fenómenos más complicados, como la dependencia de la consonancia con el timbre. Quizá los diagramas de recurrencia, aplicados a sonidos con timbre en lugar de a tonos puros, arrojen nueva luz sobre esta cuestión.

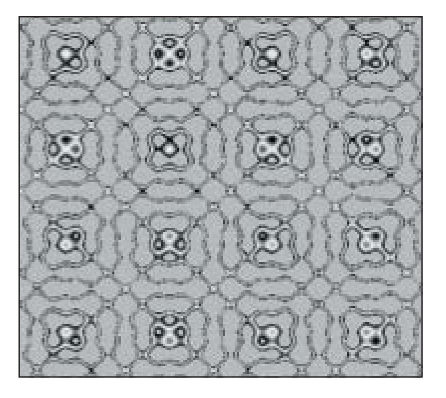


3. Diagramas de recurrencia de una señal perfectamente periódica (*izquierda*) y de la misma señal perturbada por un ruido (*derecha*).



4. Diagramas de recurrencia de la intensidad de las manchas solares (*izquierda*) y del índice Dow-Jones (*derecha*).





5. El diagrama de recurrencia para un intervalo consonante (*izquierda*) y uno disonante (*derecha*).

LIBROS

Ciencia medieval

Judaísmo

SCIENCE IN THE MEDIEVAL HEBREW AND ARABIC TRADITIONS, por Gad Freudenthal. Ashgate Publishing Limited; Aldershot; 2005.

DAS BUCH DER FIEBER DES ISAAC ISRAELI UND SEINE BEDEUTUNG IM LATEINISCHEN WESTEN. EIN BEITRAG ZUR REZEPTION ARABISCHER WISSENSCHAFT IN ABENDLAND, por Raphaela Veit. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 2003.

MAÏMONIDE PHILOSOPHE ET SAVANT (1138-1204). Etudes Reunies par Tony Lévy et Roshdi Rashied. Peeters; Leuven, 2004.

ALEPH-HISTORICAL STUDIES IN SCIENCE & JUDAISM. N.º 2 (2002). The Hebrew University of Jerusalem.

I RICETTARI DI FEDERICO II. DEL "MERIDIONALE" AL "LIBER DE COQUINA", por Anna Martellotti. Leo S. Olschki Editore; Florencia, 2005.

A lo largo de los siglos octavo y noveno de nuestra era, la civilización islámica se apropió de la medicina, ciencia y filosofía griegas, así como de buena parte de la ciencia hindú y persa. Contó para ello con un competente plantel de traductores del pahlavi, sánscrito, griego y siríaco; el árabe, la lengua de destino, se convirtió en la *lingua franca* de la ciencia y la filosofía durante siglos. De hecho, entre el 800 y el 1450, los principales centros de estudio de las ciencias exactas y naturales pertenecían al mundo islámico. Tuvo ese movimiento un arranque espectacular con la fundación de la Casa de la Sabiduría en Bagdad por el califa abásida al-Mamún (198/813-218/833) y la concesión de la dirección de la empresa a Hunain ibn Ishaq (192/808-260/873 o 264/877), quien centró su atención en la traducción y reelaboración de las obras de Aristóteles y Galeno.

No todos sus cultivadores confesaban la religión de Mahoma. El componente cristiano importante en diferentes fases de la versión árabe, resultó determinante en la traducción posterior del árabe al latín. También hubo una notable contribución judía. Uno de sus principales representantes fue Ishaq ibn Sulayman al-Israili, latinizado Isaac Israeli o Isaac Iudaeus (*Das Buch der Fieber des Isaac Israeli und seine Bedeutung im lateinischen Westen. Ein Beitrag zur Rezeption arabischer Wissenschaft in Abendland*). Este médico trabajó en Kairuán y Egipto durante la primera mitad del siglo X.

Del declive de Bagdad se aprovechó Kairuán, primer centro importante magrebí de la medicina islámica. Capital del emirato aglabí, situada a ciento cincuenta kilómetros al sur de Túnez, alcanzó una extraordinaria pujanza económica y comercial tras la conquista aglabí de la Sicilia bizantina (827) y hasta que sus sucesores fatimíes trasladaron la capital a Mehedia (926), medio siglo antes de la fundación en Egipto de El Cairo (972). Allí brilló su maestro Ibn Imran, Isaac escribió el *Liber febrium* (*Kitab al-hummayat*), una de las obras médicas más influyentes en la Edad Media, y su discípulo Ibn al-Yazzar redactó su libro sobre los grados de los medicamentos simples.

Los informes más antiguos sobre la vida y obra de Isaac Israeli proceden de Ibn Gulgul (343/954-384/994), médico originario de Córdoba, quien nos dejó en 377/987 un repertorio de biografías médicas en árabe. Lo escribió pocos años después de la muerte de Israeli y no muy lejos de su patria. La proximidad cronológica y espacial de esa fuente, así como el estilo sentencioso de Ibn Gulgul, le concede una muy alta credibilidad. Sabemos así que Isaac Israeli era de estirpe judía y nació a mediados del siglo nono en Egipto. Murió en el siglo siguiente, a edad avanzada. Fue médico del soberano de Kairuán entre 292/905 y 296/909.

La obra de Isaac Israeli se reparte entre escritos filosóficos y escritos médicos, con un tercer mixto, un tratado de ética profesional, la *Guía de médicos*. Pertenecen al primer grupo *Definiciones y descripciones*, *Las sustancias*, *El espíritu y el alma* y *Los elementos*, donde desarrollaba una doctrina neoplatónica. Mucho más importante, según observara ya Maimónides, fue su aportación a la medicina. Se inscriben en el segundo grupo *De urinis*, *Sobre la dieta* y, por encima de todos, *Sobre las fiebres*, todos ellos traducidos al latín por Constantino el Africano. El tratado *Sobre la orina* expone el interés diagnóstico de la misma, según su naturaleza, coloración, sustancias y partículas. En su parte general, el tratado *Sobre la dieta* esboza los principios generales del recto equilibrio humoral que luego aplica en la parte especial dedicada a los diversos alimentos: frutos secos, leche, carnes, aves, verduras, aguas y vinos. El *Liber febrium*, la primera monografía árabe sobre la cuestión, se divide en cinco partes: fundamentos teóricos de las fiebres, según la patología humoral; fiebres efímeras, es decir, aquellas que se originan en los tres espíritus (vital, natural y animal); fiebres hécticas (resultantes, por ejemplo, de la tuberculosis y en las que estaban afectados, además de los espíritus y los humores, los miembros y partes sólidas del cuerpo), fiebres agudas (propias, entre otros, de los casos de pleuritis), y fiebres pútridas, que afectaban a "espíritus y humores" (sangre, flema, bilis o cólera amarilla y negra).

Constantino el Africano procedía de la misma región norteafricana de donde era originario Isaac, si no de la misma ciudad de Kairuán. Se supone que llegó a Salerno poco antes de

su conquista por el duque normando Robert Guiscard (1077). Allí gozó del amparo del arzobispo Alfano y del abad Desiderio, del monasterio benedictino de Montecassino. El propio Alfano, en su juventud, había ejercido la medicina y traducido al latín *Sobre la naturaleza del hombre*, de Nemesio de Emesa (siglo IV), donde se expone una suerte de galenismo cristianizado. En justicia, sin embargo, debemos reconocer a Constantino, "maestro de Oriente y Occidente", la introducción del galenismo en el mundo cristiano. Además de las obras médicas de Isaac Israeli mencionadas, vertió para los europeos numerosos tratados árabes galénicos e hipocráticos, entre ellos la *Isagogé* (Introducción) y *Pantechne* (Toda la técnica), la guía médica para viajeros (*Viaticum*) y el compendio sobre los "grados" de los medicamentos simples (*Liber de gradibus*) de al-Yazzar.

De la traducción latina de los libros filosóficos de Isaac Israeli se ocupó Gerardo de Cremona (*ca.* 1114-1187). Ya en la baja Edad Media, un tal maestre Pedro, probablemente un judío, vertió al castellano *Sobre las fiebres,* que se conserva en el manuscrito MI28 de El Escorial. No se realizó desde la versión latina de Constantino, contraída en algunas de sus partes, sino desde la versión árabe o hebrea, las únicas completas.



1. De acuerdo con la teoría humoral, la densidad y coloración de la orina ayudaba a descubrir las posibles patologías del individuo.

Conocida es la importancia de esa labor traductora para el desarrollo del saber occidental. En la alta Edad Media, el cultivo de la medicina permanecía confinado en el claustro. Se trataba además de un conocimiento predominantemente empírico, compendiado en la enciclopedia de Isidoro o en los extractos de Beda el Venerable y Hrabano Mauro. Desde las postrimerías del siglo X y, sobre todo, inicios del siguiente, el panorama adquiere claros perfiles científicos en la escuela de Salerno, aunque persista en sus comienzos una orientación práctica, como se desprende del *Passionarius* de Garioponto. Y es entonces cuando irrumpe Constantino, a quien seguirán otros traductores, solitarios o en grupo, por encima de todos la escuela de traductores de Toledo. En el siglo XIII llegaron nuevas traducciones, ahora del original griego.

Una de las cuestiones que dividieron profundamente a los judíos medievales era la de la incorporación o no del saber "gentil" (*Science in the Medieval Hebrew and Arabic Traditions*). En Bagdad, Saadia Gaon (882-942) compuso en árabe dos obras filosóficas sobre la compatibilidad de la ley mosaica y la investigación filosófica. España se mostró la más abierta, con Maimónides (1135-1204).

Abu Imram Misa ibn Maymun al-Qurtubi (Maimónides), que desarrolló buena parte de su actividad profesional en Egipto, había adquirido su formación médica, científica (astronomía y matemáticas) y filosófica en Occidente, en su España natal y en el norte de Africa. A su llegada a El Cairo, hacia 1166, es decir, a sus veintiocho años (*Maïmonide Philosophe et S*avant), no tardó en abrirse un hueco en los círculos intelectuales y políticos. Hasta 1171, en que fue elevado a la jefatura de la comunidad judía, se venía ganando la vida con el comercio de piedras preciosas y otras actividades. Coincidió ese ascenso con su nuevo puesto de médico y consejero del sultán fatimida Salah al-Din al-Ayyubi. Sirvió también a Malik al-Aldal Nur al-Din, hijo mayor, y sucesor, del sultán Saladino. A Malik le dedicó *El régimen de salud* (1198) y *Sobre las causas de los síntomas* (1200). En esas dos obras, dirigidas a un hedonista depresivo, Maimónides no olvidaba su tarea de médico del alma que ofrecía un *regimen sanitatis* completo; para animar su melancolía, Maimónides le recetó vino y música, estrictamente prohibidos para un musulmán observante.

Lo cierto es que todos sus escritos médicos pertenecen a su época cairota. Su único comentario formal lo consagra a los *Aforismos* de Hipócra-



2. Enfrentamiento entre partidarios del cálculo con ayuda del ábaco (*derecha*), representados por Pitágoras, y los partidarios del cálculo algorítmico, representados por Boecio (*izquierda*).

tes. Seguidor de Galeno no se recaba someterlo a una dura crítica en el capítulo 25 de la *Pirqei Mosheh*, antología de extractos del pergameno y de otros autores. Amén de otros compendios, preparó para su propio manejo un diccionario farmacéutico. De amplia difusión gozaron sus monografías especializadas: *Sobre la higiene*, *Sobre el asma*, *Sobre las hemorroides*, *Sobre las relaciones sexuales* y *La explicación de los accidentes*.

Reflexiona en torno a una cuestión recurrente en los grandes maestros, la de la naturaleza de la medicina. Sólo los insensatos recurren al médico cuando se encuentran enfermos. Importa el régimen, que nos indica preventivamente la mejor forma de mantener la salud. Con Hipócrates, declara que propio del médico es subvenir a la naturaleza. Y recuerda la opinión de al-Razi: si el enfermo es más fuerte que el paciente, ningún médico puede hacer nada; si el paciente es más fuerte que la enfermedad, sanará sin ayuda del médico; la intervención médica es deseable solamente en el caso en que la situación no esté determinada.

De su labor rabínica y su enérgica promoción de la apertura de la comunidad al saber gentil dan muestra el comentario a la *Mishnah*, compuesto en árabe y terminado hacia 1168; la *Mishnah Torah* o *Repetición de la Ley*, un código rabínico monumental que redactó en hebreo en torno a 1180. Y, sobre todo, la *Guía de perplejos*, escrita en árabe hacia 1190. En muchos lugares de la *Guía*, Maimónides subraya la importancia de la formación en lógica para alcanzar la verdad según un proceso ordenado. El aprendizaje de las disciplinas propedéuticas (astronomía, matemáticas y lógica) revela la aptitud del discípulo para recibir los “secretos de los libros proféticos”. Si con ello no alcanza todavía el sentido profundo, deberá conocer la física y la metafísica.

En sus comentarios a las sentencias rabínicas de la *Mishnah*, densas y a veces elípticas, Maimónides invoca las matemáticas para aclarar determinados puntos obscuros o resolver controversias entre los doctores de la Ley; llega incluso a equiparar las reglas matemáticas elementales con las reglas estrictamente jurisdiccionales. Dos problemas matemáticos merecen en particular la atención de Maimónides: las cuestiones relativas a la medida del círculo (estatuto del número pi) y el problema de los números que carecen de una raíz cuadrada exacta (estatuto de los números irracionales). En particular, sin mermar la universalidad del discurso científico, justifica el recurso a la astronomía para la solución práctica de los problemas del calendario, lo que conlleva la sanción rabínica de determinadas ideas científicas.

A lo largo de dos siglos y medio, los estudiosos judíos del sur de Francia y norte de España, familiarizados con el saber árabe (enciclopedistas, traductores y filósofos), pusieron ese conocimiento al alcance de su linaje. Se produjo una apropiación a una escala desconocida hasta entonces de la ciencia “gentil” por unas comunidades que habían permanecido cerradas en su aprendizaje tradicional, en hebreo.

Gad Freudenthal distingue tres fases en la recepción judía de la ciencia y la filosofía árabes: 1) comienzo del proceso de transmisión en torno a principios del siglo XII, cuando los estudiosos españoles tradujeron obras científicas del árabe al hebreo para las comunidades refugiadas al norte de los Pirineos; 2) apogeo del proceso, en la segunda mitad del siglo, cuando los judíos andaluces, sumergidos en la cultura árabe, huyeron de las persecuciones almohades hacia el norte de España y sur de Francia, acelerando la traducción al hebreo de obras filosóficas; 3) renovación del proceso, en los primeros decenios del siglo XIII, con la traducción al hebreo de la *Guía de perplejos*. Este período de intensa traducción perduró hasta mediados el siglo XIV, momento en que declina la curva.

Destaca en la fase inicial Abraham bar Hiyya de Barcelona (fallecido en torno a 1145). Líder político y conocedor de la ciencia de su tiempo, resumió en hebreo buena parte de ese saber, a petición de judíos notables del norte de España y sur de Francia, que sentían la necesidad de instruirse. Redactó manuales de geometría práctica (topografía) y astronomía (cálculo del calendario), amén de componer una enciclopedia de cultura general. Su contemporáneo Abraham ibn Ezra (1089-1164) difundió entre los suyos la matemá-



3. En la corte de Federico II se fomenta el conocimiento humoral de la dietética y se protege un nuevo género literario: la gastronomía.

tica, la astronomía, la astrología y la filosofía. Las inclinaciones espiritualistas de ibn Ezra tiñeron de un color especial sus escritos aritméticos o matemáticos y ayudó a introducirlos en círculos que se caracterizaban por su hostilidad hacia el "saber gentil". Con ello logró legitimar la compatibilidad del saber profano con la correcta comprensión de la Torah.

Huyendo de la persecución almohade, numerosas familias judías españolas buscaron refugio entre sus correligionarios del mediodía francés. Se encontraban éstos todavía muy apegados a las enseñanzas talmúdicas, mientras que los inmigrantes se desenvolvían con soltura en poesía, literatura, gramática, filosofía y ciencia árabe. En una labor extraordinaria de puente, los recién llegados y sus descendientes trasladarán del árabe al hebreo el grueso de la ciencia medieval. Tarea que se ejemplifica en la familia "tibbónida". A Yehuda ibn Tibbon (c.1120-90), "padre de los traductores", le siguió su hijo Shmuel (1150-1230); a éste, su vástago Moshe (fl.c. 1240-85). Shmuel Ibn Tibbon tradujo en 1204 la *Guía de perplejos*. Entre una gavilla nutrida de otros intermediarios merecen citarse Yakob Anatoli (1194-1256), Yakob ben Makhir (c.1236-1304) y, sobre todo, Qalonimos ben Qalonimos (1286-p.1328). Las versiones, de óptima factura en la mayoría de las ocasiones, pusieron al alcance de la comunidad la lógica de al-Farabi, Ibn Sina e Ibn Rushd, la matemática de Euclides y Arquímedes, la astronomía de Ptolomeo, Jabir ibn Aflah y al-Bitruji, la historia natural de Aristóteles. Y los comentarios de Averroes a los libros físicos del estagirita.

A esa labor de traslación hemos de sumar las aportaciones originales (*Aleph-Historical Studies in Science & Judaism*. N.º 2, 2002). Contribuyeron de manera significativa y permanente a la astronomía, con nuevos tratados, cálculos de tablas astronómicas e invención de nuevos instrumentos. Menos determinante fue su creatividad matemática, aunque Tony Levy ha descubierto un breve texto hebreo que constituye una adaptación de la famosa *Algebra* de Muhammad ibn Musa al-Khwarizmi (siglo nono), lo que contradice el escepticismo dominante sobre el conocimiento de esa ciencia en las comunidades hebreas. La física, aristotélica, se comenta en el marco de problemas teológicos sobre la existencia de Dios, la incorporeidad y la eternidad del mundo, aunque no parecen conocer la teoría del *impetus*, quizá novedad principal de la física medieval. En lógica se supera la atonía manualística elemental con el *Sefer ha-heqqesh ha-yashar* (*Libro del silogismo correcto*) por Levi ben Gerson (Gersónides).

La verdad es que en Levi ben Gerson (1288–1344) hallamos sintetizada la quintaesencia de la creación hebrea del sur de Francia. Demuestra Bernard R. Goldstein que, en su *Libro de Astronomía*, procuró mejorar la explicación ptolemaica del movimiento planetario en longitud y latitud. Los modelos de Ptolomeo presentaban fallos, aun cuando los datos en que se fundaban eran satisfactorios. Levi parte de pasajes del *Almagesto* y del libro II de las *Hipótesis planetarias* del alejandrino. Advierte que, a diferencia de lo cumplido en el *Almagesto* —citar observaciones fechadas para establecer sus teorías de las longitudes planetarias—, Ptolomeo no expresó tales observaciones fechadas para las latitudes planetarias. Laguna que colma Gerson, aunque tengamos que lamentar que no hayan llegado hasta nosotros las tablas correspondientes a la teoría de Levi sobre latitudes planetarias. (Sabido es que las opciones alternativas a las teorías de Ptolomeo sobre la latitud en la Edad Media eran los modelos hindúes, representados en forma tabular en el *zij* de al-Khwarizmi y los de Nasir al-Din al-Tusi.) Otro aspecto reseñable de esa obra magna de la astronomía medieval es la lista de 42 estrellas zodiacales junto con su número ordinal en la correspondiente constelación del catálogo de Ptolomeo, descripción, magnitud y coordenadas de la eclíptica para 1336.

La dieta, además de un refinamiento de la mesa del poderoso, formaba parte de la terapia medieval, de los llamados regímenes de salud. Había también que acomodarla a las restricciones de las tres grandes religiones monoteístas. Se hallaba, pues, a medio camino, entre la mera praxis artesanal y la regulación científico-humoral; sobre ella se está descubriendo un imponente fondo documental. Subgénero recetario en un comienzo, adquirió cuerpo en la Italia tardomedieval y culminó en el famoso *Liber de coquina*, escrito en un agradable latín hablado entretejido de vulgarismos, que describe las preparaciones más variadas: hervidos, purés, salsas, carnes, leche, queso o pescado (*I ricettari di Federico II. Del "Meridionale" al "Liber de coquina"*).

Entre recetarios escasamente estructurados, como el *Meridionale* o el *Toscano*, y la vertebración perfecta del *Liber de coquina* se da un tránsito bastante suave. El estilo de las recetas refleja el entorno de su recopilación. El rasgo más sobresaliente del *Recetario "Meridionale"* está constituido por la presencia concurrente del italiano y del latín, lo que nos remite a un texto constituido por yuxtaposición de breves recetarios, manípulos de preparaciones, monografías o apuntes dispersos. Las recetas coinciden con otras del *Liber de coquina*. Este nos ha sido transmitido junto con otro libro clásico de la gastronomía en lengua latina, el *Tractatus*, en dos manuscritos conservados en la Biblioteca Nacional de París. El más antiguo (A) es el códice misceláneo 7131, redactado entre 1308 y 1344 por Enrico de Mondeville, cirujano de Felipe IV el hermoso (1285-1314). El otro ejemplar (B) corresponde al manuscrito misceláneo latino 9328, de la misma sede.

—LUIS ALONSO

Mark Fischetti

MALECONES

Brechas y derrumbes

El huracán Katrina se abatió sobre Luisiana a primera hora de la mañana del lunes 29 de agosto de 2005. Al anochecer reventaban en Nueva Orleans los malecones y muros de riada. Desde entonces, cuatro equipos han investigado lo ocurrido.

Dirigió el equipo de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) Peter G. Nicholson, ingeniero de la Universidad de Hawai en Manoa. En su testimonio del 2 de noviembre ante el senado de EE.UU., afirmó que su grupo había observado “varios mecanismos de fractura” que causaron “docenas de brechas” en la red de malecones.

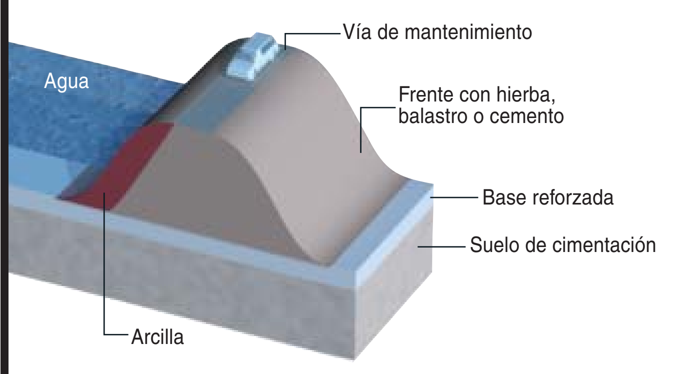
Los tres modos de fractura más corrientes son similares en los malecones de tierra, fluviales y lacustres, y en los muros de riada de hormigón de los canales de navegación y de avenamiento. Estos mecanismos ya se conocen en todo el mundo como causas de la mayoría de las roturas de diques; de uno u otro modo el agua debilita la base de la barrera hasta que ésta vuelca o se derrumba.

Es crucial una buena cimentación. En los llanos aluviales hacen falta malecones, pero sus suelos tienden a ser húmedos y pueden cambiar cada cien metros a lo largo de cualquier trayecto. El que se elija dependerá de los tipos de suelo del lugar, de su resistencia y de la presión local del agua, señala Francisco Silva-Tulla, consultor de mecánica de suelos de Boston y miembro del equipo de la ASCE.

La construcción empieza después de que sondeos y estudios de campo hayan caracterizado el terreno. Lo habitual es que, a lo largo del trayecto, se excaven zanjas y fosos poco profundos de los que extraer tierra para el malecón. Debe procurarse que no se den filtraciones a través o por debajo de la canalización. Hay que estabilizar también los taludes y construir la barrera con más altura de la necesaria para contrarrestar el asentamiento, que puede llegar a deprimir la estructura un 5 por ciento en los suelos compactados durante la construcción y el 15 por ciento en los materiales no compactados. Los malecones recién construidos deben asentarse durante uno o dos años.

La altura del malecón, la profundidad de sus cimientos o pilotajes, la calidad de los materiales, el grado de compactado (conseguido pasando maquinaria pesada por encima de las capas) y el tipo de acabado de los taludes dependen del dinero con que se cuente. Los informes de los investigadores aclararán si fue un mal diseño, una construcción deficiente o simplemente un tamaño insuficiente de los malecones la causa de que se anegaran Nueva Orleans y toda la costa del Golfo.

1. A LO LARGO DE LOS RIOS se construyen malecones, de tierra. Los suelos arenosos, aunque resistentes, son permeables al agua; los arcillosos son menos resistentes pero más impermeables. El modelo varía mucho de un lugar a otro. No obstante, lo ideal es que la base consista en un suelo resistente y la cara expuesta al agua sea de arcilla. Las pendientes se rematan con hierba, piedras o cemento directamente vertido, citados de menos a más por su efecto protector contra la erosión.

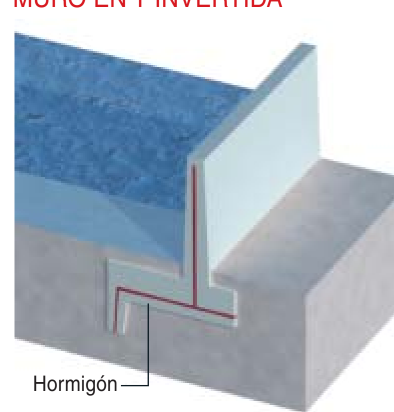


MURO EN I

Hormigón

Barras de armado

Tablestaca de acero



BRYAN CHRISTIE DESIGN

2. LOS MUROS DE RIADA pueden levantarse directamente junto a los canales o rematando malecones, para añadirles altura donde no exista espacio para ampliarlos. Los muros en I se anclan con tablestacas de acero. Los muros en T invertida se anclan con un pie de hormigón, que resiste más a las fuerzas laterales y reduce la erosión del cimiento. En Nueva Orleans, los muros en I cedieron con mayor facilidad que los muros en T.

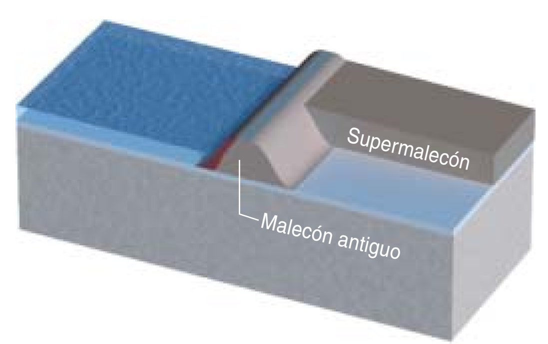
¿SABIA USTED QUE...?

➤ LICUEFACCION: Un seísmo puede hacer que un malecón se desprenda por la base, sobre todo si la cimentación es arenosa o limosa y se empapa de agua. Los temblores licuan la capa acuosa como una batidora y el malecón o muro puede resbalar lateralmente a lo largo de decenas de metros, hasta desplomarse.

➤ TRANSICION PELIGROSA: En Nueva Orleans, se abrieron numerosas brechas en los puntos de encuentro de un malecón de tierra con un muro de riada de hormigón. El agua, en su crecida, erosionaba la unión, un punto débil siempre, y se abría paso a través de ella. Hay transiciones peligrosas cuando un malecón se encuentra con muros de riada, compuertas, estribos de puentes u otro malecón de diseño diferente.

➤ ALERTA PRECOZ: Si el personal de mantenimiento o los responsables de las emergencias detectan una zona débil en un tramo de un malecón, pueden afianzarla u ordenar una evacuación. Kane GeoTech, de Stockton (California), ha instalado varios “malecones inteligentes” en Tyler Island, en el delta del río Sacramento. En la margen del río y dentro del malecón, en su eje geométrico y en la puntera del lado de tierra, se colocan piezómetros que miden la presión del agua. También se tienden sensores de cable coaxial. Todos los instrumentos están conectados a un ordenador instalado en una caja de mediciones; un técnico puede leer los datos, si no se radiotransmiten. Pueden hacerse lecturas cada pocos minutos. Los cambios de presión en un piezómetro revelan la creación de una corriente interna (*véase la figura*) y los sensores coaxiales advierten de que un malecón ha empezado a desplazarse; ambas cosas presagian una brecha.

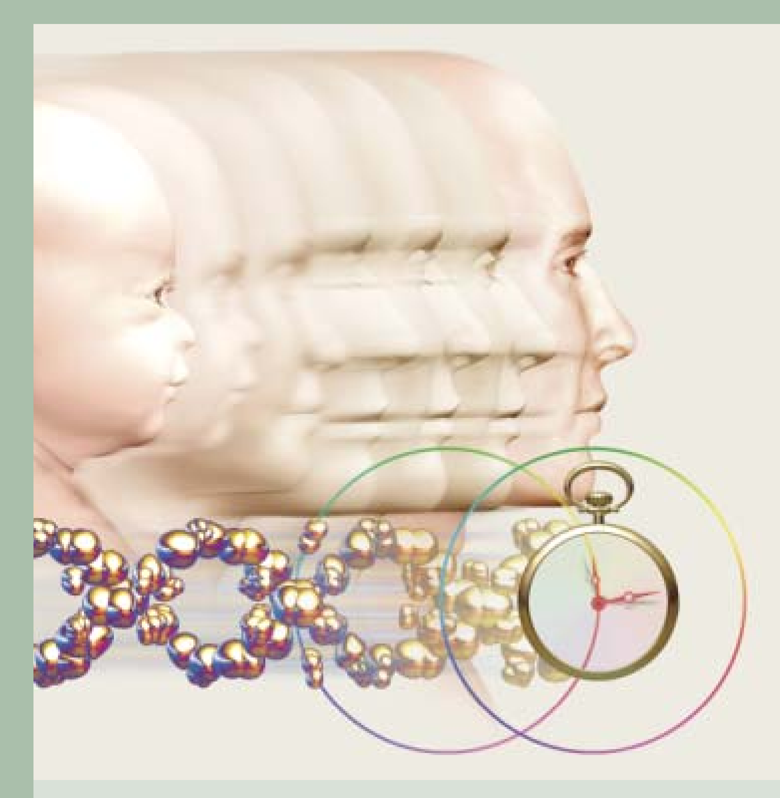
3. LOS SUPERMALECONES ofrecen una protección muy superior. En Japón los están construyendo para afianzar los malecones corrientes, que podrían cuartearse con los terremotos. Su anchura es tal (30 veces su altura), que hay que derruir muchos de los edificios existentes para ganar espacio, salvo donde una tormenta haya despejado ya el lugar.



Desborde
a
Erosión
b
Corrimiento
Suelo saturado
c
Veneros

4. UNA BRECHA obedece a varias causas. En (*a*), el agua de una riada desborda el malecón o muro y erosiona la base; con ello, debilita la resistencia lateral y el dique vuelca. En (*b*), el suelo de cimentación ha desarrollado una mayor presión intersticial de agua y pierde resistencia a la cizalla, por lo que el muro se desliza lateralmente sobre la capa acuática subyacente. En (*c*), en un suelo erosionable, las filtraciones debidas a la alta presión del agua han abierto “veneros” bajo el muro, socavando la cimentación: el muro se derrumba.





LOS GENES DE LA LONGEVIDAD, por David A. Sinclair y Lenny Guarente

Un grupo de genes que controlan las defensas del organismo ante situaciones de estrés mejoran también el estado de salud y alargan la vida. El conocimiento de su actividad podría llevarnos a comprender las claves para prolongar la esperanza de vida y desterrar enfermedades propias de la ancianidad.



TAENIA SOLIUM: UN PARASITO COSMOPOLITA, por Ana Flisser, Laura Vargas-Parada y Juan Pedro Laclette

La neurocisticercosis, infección del sistema nervioso central por la larva del parásito intestinal *Taenia solium*, es causa frecuente de convulsiones y epilepsia. Constituye un importante problema de salud en Iberoamérica, Africa y Asia.



BLINDAJE DE LOS VIAJEROS ESPACIALES, por Eugene N. Parker

Los rayos cósmicos representan un obstáculo crítico, si no insuperable, para los viajes tripulados a Marte y más allá del planeta rojo.

LOS LIMITES DE LA RAZON, por Gregory Chaitin

De las ideas sobre la complejidad y el azar que ya adelantó Gottfried W. Leibniz en 1686, combinadas con la moderna teoría de la información, se deduce que nunca podrá existir una “teoría del todo” para las matemáticas en su conjunto.

LA ACIDIFICACION DE LOS OCEANOS, por Scott C. Doney

Gran parte del dióxido de carbono liberado por la quema de combustibles fósiles va a parar al océano. Ello provoca una alteración de la acidez del medio con graves repercusiones para la vida marina.

